

# L'estudi dels processos de formació dels sediments arqueològics i dels paleosòls a partir de l'anàlisi dels fitòlits, els minerals i altres microrestes

Els casos de la Gorja d'Olduvai, l'Abric Romaní, El Mirador i Tel Dor

**Tesi de Doctorat**

Dan Cabanes i Cruelles

Direcció: Rosa Maria Albert i Eudald Carbonell

Universitat Rovira i Virgili, Departament d'Història i Geografia

Àrea de Prehistòria - IPHES

*With your feet in the air and your head on the ground*

*Try this trick and spin it, yeah*

*Your head will collapse*

*But there's nothing in it*

*And you'll ask yourself*

*Where is my mind?*

*Where is my mind?*

*Where is my mind?*

*Way out in the water*

*See it swimmin' ...*

The Pixies, 1988, Where is my mind. Surfer Rosa, 4AD  
Boston, Massachusetts

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI

L'ESTUDI DELS PROCESSOS DE FORMACIÓ DELS SEDIMENTS ARQUEOLÒGICS

I DELS PALEOSÒLS A PARTIR DE L'ANÀLISI DELS FITÒLITS , ELS MINERALS I ALTRES MICRORESTES

Dan Cabanes i Cruelles

ISBN:978-84-692-1535-7/DL-T-378-2009

*Per als meus pares,  
per al meu germà,  
per als meus iaies i iaies,  
i per a Maite.*

## Agraïments

En primer lloc he d'agrair a la doctora Rosa Maria Albert i al catedràtic Eudald Carbonell la direcció d'aquesta tesi. A Rosa, perquè ja tenim confiança, li agraeixo la seva implicació en aquest treball, les hores que ha perdut, les correccions estrictes, les discussions, i sobretot la meua formació com a científic. Perquè ha estat un model a seguir i perquè no hi ha millor direcció de tesi, gràcies. A Eudald li he d'agrair que em donés una oportunitat per entrar en el món de l'arqueologia a través d'un equip tan gran, que em deixés participar en els seus projectes i que em fes comprendre què és la ciència.

Als membres del tribunal, vinguts d'arreu, he d'agrair l'esforç de jutjar un treball que està parcialment escrit en català.

Als equips que treballen en els jaciments estudiats, especialment als del Mirador i el Romaní perquè sé quan dura és la feina, però també al *Olduvai Landscape and Palaeoanthropology Project* i a l'equip de Tel Dor, he d'agrair-los a tots que hagin dut a terme un treball rigorós en el camp, gràcies al qual s'ha pogut realitzar aquesta tesi.

Agrair també a la Fundación Atapuerca i al Ministerio de Educación y Ciencia l'ajuda i la beca rebudes.

He de donar les gràcies a tots aquells companys de feina que han participat activament en les discussions i l'elaboració dels articles que formen aquesta tesi. En especial vull recordar l'ajuda i el suport rebut del grup d'Arqueobotànica de la URV. Gràcies a Quico per la seva paciència, a Isa perquè escolta els meus silencis dins i fora del zulo, a Ethel perquè sempre veu el got mig ple, a Itxaso pel seu esperit de treball, a Anna perquè ha estat des del principi, a Ríker per deixar-me la meitat de la seva taula i a Mònica per no fer-me cas.

També tinc molt que agrair a la resta de gent de l'Àrea de Prehistòria, en especial a la Isa Cáceres per les seves revisions i les seves aportacions (i perquè ja no em fa por), a Pep Vallverdú per l'ajuda imprescindible en el cas del Romaní i la formació en geologia, a Josep Maria Vergès pel suport durant la investigació en El Mirador (i perquè sempre acabem rient). Durant aquests anys he compartit molts moments bons amb molts d'altres membres de l'equip, dins i fora de la feina, especialment m'agradaria mencionar a Palmira i Rosa perquè sempre els hi pregunto coses, però també a Jordi Rosell, Ruth, Andreu, Xosé, Marina Mosquera, Marina Lozano, Toni, Manolo, Montse, Carlets, Loli, Núria, Robert i Jordi Agustí què són els que més cas em fan. També a la gent que fins fa poc estava com jo o hi continua estant, m'estic referint a becaris i no becaris, Lluc, Pablo, Patricia, Juanin, Bruno, Gerard, Luna, Juanma, Àlex, Gala, Jaume, Leti, Luna, Amelia, i molts d'altres que continuen arribant. També agrair a tots els membres del Servei de Recursos Científics i Tècnics tota l'atenció que m'han donat.

Durant el procés d'elaboració d'aquesta tesi també he rebut ajuda de gent de fora de Tarragona, sobretot tinc molt que agrair a Marta Portillo i Xavier Esteve, de la UB, però també a la gent de CENIEH, en especial a Diego i a Jesús, i a l'equip de la Universitat Autònoma de Madrid, sobretot a Diego i Javier.

Fora del país mereixen un agraïment sincer Steve, Ruth, Francesco i Elisabetta per haver-me acollit tan bé durant les meves estades a Israel, i sobretot per haver-me ensenyat com eren els fitòlits i per a què servia un FTIR. A Arlene, Richard i Linda gràcies pel vostre temps durant les meves estades a Londres i a Denver, i també per poder utilitzar les col·leccions de referència.

A Carolina Mallo! he d'agrair-li moltes coses, massa potser, però sobretot gràcies per Weinberg, Callexico, Niels i Tomas.

A Paul Goldberg gràcies per donar-me una idea genial per a una tesi davant d'una pomada.

A Amalia, Kevin, Marta i Claire gràcies de tot cor per poder participar en el projecte de Menorca i fer que la feina no pugui ser més agradable.

Perquè els caps de setmana també són importants, sobretot si arribes tard, gràcies a Ana, Eva, Abi, Antonio i Laura per rescatar-me quan més falta em feia. També vull agrair a Núria i Cesc les canyetes i els festivals. Als que també tenen un màster *in the night*, Satur, Sergi i Àngel, gràcies per dotze anys d'amistat. A la penya de Burgos, Rodrigo, Àngel, Marcos, Sandra, Felipe (comando itinerante), Mari, Bea, gràcies per deixar-me ser del vostre poble més d'un mes a l'any. Als meus amics del poble, que han aguantat fins al final i que no m'han deixat mai tirat; a Conole, Joan, Lucas, Santos, Sandra i Mireia milions de gràcies per ser com sou i per estar sempre allí. A la penya del Way, gràcies per quinze anys de festes i bona música. Si els caps de setmana són importants, els dies de cada dia també ho són, gràcies a Xavi, Jordi, Oriol, Josep Maria i Joan, per tantes i tantes hores de fred, cansament i "tubos milagrosos".

Tinc molt que agrair als meus pares: no m'han deixat donar suport ni un segon i que no m'han qüestionat mai aquesta feina, ni tan sols quan amb dotze anys vaig dir que volia ser arqueòleg. Al meu germà Francesc vull agrair-li que a més d'un germà tingui un amic. A la meua iaia Anita, ma iaia Pili, mon iaio Sisco i, encara que no estigui, lo iaio Punxa, gràcies per tot lo carinyo d'aquest anys. A Teresín, Miguel, Verònica i David gràcies pels milions de favors. A Sisco i a Pili, gràcies per ser tan autèntics i per les paelles al camp d'arròs.

Maite, gràcies per aguantar l'*sprint* final d'aquesta carrera, però sobretot gràcies per aguantar-me a mi.

A tots aquells que m'heu ajudat en algun moment i que no us he anomenat, gràcies per tot.

I per a no oblidar-me de ningú, i perquè tothom en té, als meus enemics: gràcies per fer que ara sigui més fort i més ràpid.

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI

L'ESTUDI DELS PROCESSOS DE FORMACIÓ DELS SEDIMENTS ARQUEOLÒGICS

I DELS PALEOSÒLS A PARTIR DE L'ANÀLISI DELS FITÒLITS , ELS MINERALS I ALTRES MICRORESTES

Dan Cabanes i Cruelles

ISBN:978-84-692-1535-7/DL-T-378-2009

# Índex

<b>Prefaci</b>	<b>1</b>
<b>1. Introducció</b>	<b>3</b>
<b>1.1. Els jaciments</b>	<b>10</b>
1.1.1. <i>La Gorja d'Olduvai</i>	10
1.1.2. <i>L'Abric Romaní</i>	12
1.1.3. <i>La Cueva de El Mirador</i>	14
1.1.4. <i>Tel Dor</i>	16
<b>2. Hipòtesis i objectius</b>	<b>19</b>
<b>3. Marc teòric</b>	<b>27</b>
<b>3.1. Els processos de formació</b>	<b>29</b>
3.1.1. <i>Antecedents i formació del corpus teòric</i>	30
3.1.2. <i>Tipus de processos de formació: processos de formació naturals i processos de formació antròpics</i>	31
3.1.3. <i>Disciplines implicades en l'estudi dels processos de formació</i>	34
3.1.3.1. <i>L'etnoarqueologia, l'arqueologia experimental i la tafonomia</i>	35
3.1.3.2. <i>La Geoarqueologia</i>	36
<b>3.2. Els fitòlits</b>	<b>38</b>
3.2.1. <i>Definició, formació i propietats dels fitòlits</i>	38
3.2.2. <i>Història de les investigacions en fitòlits</i>	39
3.2.3. <i>Aplicacions dels fitòlits</i>	40

3.2.3.1. Paleoeologia i vegetació	40
3.2.3.2. Arqueologia	41
3.2.3.3. Datacions	43
3.2.3.4. Altres aplicacions	43
<b>4. La Gorja d'Olduvai</b>	<b>45</b>
4.1. Taphonomy of phytoliths and macroplants in different soils from Olduvai Gorge (Tanzania) and the application to Plio-Pleistocene palaeoanthropological samples	47
4.2. Plio-Pleistocene macroplant fossil remains and phytoliths from Lowermost Bed II in the eastern palaeolake margin of Olduvai Gorge, Tanzania	67
4.3. Palaeoecological significance of palms at Olduvai Gorge, Tanzania, based on phytolith remains	87
<b>5. L'Abric Romaní</b>	<b>97</b>
5.1. Hearth structure and function at level J (50kyr, bp) from Abric Romaní (Capellades, Spain): phytolith, charcoal, bones and stone-tools	99
<b>6. La Cueva de El Mirador</b>	<b>111</b>
6.1. Formation processes through archaeobotanical remains: The case of the Bronze Age levels in El Mirador cave, Sierra de Atapuerca, Spain	113
<b>7. Tel Dor</b>	<b>129</b>
7.1. Phytolith-rich layers from the Late Bronze and Iron Ages at Tel Dor (Israel): mode of formation and archaeological significance	131
<b>8. Discussió</b>	<b>153</b>
8.1. Discussió per jaciments	157
8.1.1. <i>La Gorja d'Olduvai</i>	157
8.1.2. <i>L'Abric Romaní</i>	162



---

8.1.3.	<i>El Mirador</i>	166
8.1.4.	<i>Tel Dor</i>	170
<b>8.2.</b>	<b>Discussió General</b>	<b>174</b>
8.2.1.	<i>Diferenciació dels processos de formació antròpics i els processos de formació naturals a través dels fitòlits, minerals i altres microrestes</i>	174
8.2.2.	<i>Avantatges i limitacions de les anàlisis dels fitòlits per estudiar els processos de formació</i>	177
8.2.3.	<i>Aspectes metodològics</i>	179
<b>9.</b>	<b>Conclusions</b>	<b>183</b>
<b>10.</b>	<b>Referències</b>	<b>187</b>

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI

L'ESTUDI DELS PROCESSOS DE FORMACIÓ DELS SEDIMENTS ARQUEOLÒGICS

I DELS PALEOSÒLS A PARTIR DE L'ANÀLISI DELS FITÒLITS , ELS MINERALS I ALTRES MICRORESTES

Dan Cabanes i Cruelles

ISBN:978-84-692-1535-7/DL-T-378-2009

## Prefaci

Fa algun temps, durant una estada a l'estranger, va arribar a les meves mans un article de Steven Weinberg publicat a la revista *Nature* i titulat *Four golden lessons* (Weinberg, 2003). Aquest article va fer canviar la meua perspectiva de la ciència i poc a poc ha fet canviar la meua perspectiva d'una tesi doctoral. La primera de les lliçons que ens dóna Weinberg és que ningú ho sap tot, i per tant jo tampoc he de saber-ho tot. La segona de les lliçons és que és més interessant abordar un camp poc conegut que un camp on s'ha treballat molt, en el desordre es troba l'acció. La tercera lliçó és perdonar-te a tu mateix per perdre el temps, ja que molts cops és difícil saber si estàs treballant amb el problema correcte i molt sovint les investigacions i els experiments no porten a cap lloc. L'última i quarta lliçó és que s'ha de conèixer la història de la ciència, o almenys de la branca en què treballes, ja que aquest és el millor antídoto contra la filosofia de la ciència i els seus models sobresimplificats. Weinberg sap bé que com a científic molt probablement no et faràs ric, els teus amics i familiars no entendran en què treballes, i si a més investigues en el camp de les partícules elementals (o en el meu cas, en el camp de l'arqueologia), no tindràs mai la satisfacció de que el teu treball sigui útil de forma immediata. Almenys et queda el consol de reconèixer el teu treball en ciència com a part de la història, aportant un esglaó més a la llarga escala.

Aquesta tesi és fruit d'aquesta visió. No pretenc conèixer totes les conseqüències dels processos de formació ni tots els tipus de fitòlits. El mateix camp dels processos de formació, i més en concret, els processos de formació a partir dels fitòlits és un àmbit poc treballat on encara queden, i quedaran, moltes coses per dir. He passat moltes hores fent experiments que no han donat els resultats esperats o treballant problemes que finalment no tenien relació; assaig – error. Finalment, he intentat conèixer els passos dels qui abans de mi han treballat aquestes qüestions. El que s'intenta aquí és posar un esglaó més, per molt petit que sigui, dintre de la història de la ciència.

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI

L'ESTUDI DELS PROCESSOS DE FORMACIÓ DELS SEDIMENTS ARQUEOLÒGICS

I DELS PALEOSÒLS A PARTIR DE L'ANÀLISI DELS FITÒLITS , ELS MINERALS I ALTRES MICRORESTES

Dan Cabanes i Cruelles

ISBN:978-84-692-1535-7/DL-T-378-2009

# **1. Introducció**

**3**

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI

L'ESTUDI DELS PROCESSOS DE FORMACIÓ DELS SEDIMENTS ARQUEOLÒGICS

I DELS PALEOSÒLS A PARTIR DE L'ANÀLISI DELS FITÒLITS , ELS MINERALS I ALTRES MICRORESTES

Dan Cabanes i Cruelles

ISBN:978-84-692-1535-7/DL-T-378-2009

Des dels seus inicis l'arqueologia ha estat molt lligada a les ciències de la terra (Bar-Yosef, 2001). Els avanços en aquesta disciplina, però també en d'altres integrades en el camp de les ciències pures o les ciències aplicades, han permès una evolució substancial de la investigació arqueològica. Aquests avanços han transformat tant el concepte com els objectius de l'excavació arqueològica. Si en un principi era primordial recuperar les restes per realitzar successions crono-culturals, ara el que interessa és saber quins sistemes d'adaptació i models de comportament tenien els nostres avantpassats, o, en altres paraules, com vivien aquests. Per tant, part de l'interès de l'arqueologia s'ha traslladat a conèixer com van afectar els canvis climàtics en l'evolució de l'espècie i quin tipus d'activitats duïen a terme. Dins d'aquest context és necessari entendre com s'han dipositat les restes en els jaciments arqueològics i quina ha estat la seva transformació al llarg del temps, ja que els processos tafonòmics poden repercutir en la interpretació que fem del registre arqueològic. Per tal d'aconseguir això cada cop més les excavacions s'han anat tecnificant, fins al punt que una excavació ara s'assembla més a un experiment científic, únic i irrepetible, on s'intenten aplicar tots els avanços científics disponibles per extreure'n el màxim d'informació.

L'ampliació del ventall de possibilitats científiques no només ha canviat la concepció de l'excavació, sinó que també ha canviat la concepció de l'arqueòleg. Cada vegada és més comú la figura de l'arqueòleg com a veritable especialista, capaç de processar la informació que fins al moment havien de processar científics aliens a l'arqueologia. Per altra banda també es pot observar el procés contrari, científics d'altres disciplines que han esdevingut especialistes en afers arqueològics dintre dels seus camps. Així doncs, cada cop més els equips d'excavació s'han convertit en equips pluridisciplinars, on els seus membres són especialistes en diferents disciplines, algunes de les quals, evidentment, no són l'arqueologia.

Amb l'evolució del procés d'excavació també ha evolucionat l'estudi dels materials recuperats. Es procura analitzar cada resta recuperada seguint un procediment científic que molts cops implica algun tipus d'anàlisi científic-tècnic complex, fins al punt que molt sovint s'utilitzen tècniques pròpies de la química, la física i fins i tot de la medicina, com ara els TACS (Martínez *et al.*, 2004). En definitiva, s'intenta exprimir totes les possibilitats per extreure'n el màxim d'informació possible de qualsevol resta arqueològica.

Segurament, però, el canvi més significatiu s'ha produït en l'estudi dels sediments. Hem de tenir en compte que des dels mateixos orígens de l'arqueologia els geòlegs han estat treballant amb els arqueòlegs per entendre l'organització dels conjunts sedimentaris i les successions estratigràfiques (Bar-Yosef, 2001). Però en els darrers anys els sediments han esdevingut un objecte d'estudi *per se*. En l'actualitat s'agafen mostres de sediment per realitzar datacions, per investigar l'orientació magnètica dels minerals, o bé per fer estudis paleobotànics i geoarqueològics. Ja no és l'organització general dels sediments sinó el contingut microscòpic i els seus minerals els que ens aporten una informació fonamental per entendre el significat de les restes recuperades.

És en aquest context d'innovació tecnològica aplicada a l'arqueologia, i sobretot dins de la nova dimensió que pren l'estudi dels sediments, on entren en joc l'estudi dels processos de formació dels jaciments i les investigacions paleobotàniques. Els avanços científics en l'estudi dels processos de formació han permès entendre millor alguns dels conjunts arqueològics més emblemàtics per a l'evolució humana o del naixement de les civilitzacions urbanes. En part també, degut a aquest anhel d'experimentar i aplicar ciències pures al camp de l'arqueologia, se'ns fa necessari saber quina és la qualitat del material que analitzem, és a dir, en quines condicions i sobre quin tipus de material estem realitzant totes les analítiques, per tal de reduir al màxim la possible distorsió causada pel pas del temps i els processos tafonòmics.

L'estudi dels processos de formació està molt sovint relacionat amb el camp de la geoarqueologia. No obstant, també es poden abordar els problemes relacionats amb els processos de formació des d'altres punts de vista, com ara la tafonomia dels vertebrats, l'etnoarqueologia o l'arqueologia experimental entre d'altres. De fet, un dels objectius principals de la tafonomia dels vertebrats és el coneixement de l'alteració de les restes òssies així com de les empremtes deixades en aquestes restes pels processos de formació (Lyman, 1994; Cáceres, 2002).

Dintre del camp de la geoarqueologia les dues disciplines que han aportat més informació en aquest sentit són la geomorfologia i la micromorfologia dels sòls aplicada a l'arqueologia. Un avanç significatiu ha estat l'aplicació de l'Espectrofotometria d'Infrarojos per Transformada de Fourier (FTIR) a l'estudi dels minerals que formen el sediment. Aquesta tècnica permet identificar els principals minerals d'un sediment amb molt poca quantitat de mostra i amb tanta rapidesa que fins i tot s'ha treballat *in situ* durant la mateixa excavació per poder guiar millor les estratègies de treball dels arqueòlegs (Weiner *et al.*, 1995; Weiner *et al.*, 2002).

D'altra banda l'estudi de les restes vegetals recuperades als jaciments arqueològics és cada cop més habitual. Als arqueòlegs i als paleontòlegs els interessa saber com era el clima i com s'utilitzaven els recursos vegetals en el passat, així com quins eren els efectes en la conducta i l'evolució humana que provoquen els canvis climàtics i de vegetació. Els estudis de les restes vegetals s'ha centrat sobretot en les investigacions palinològiques, antracològiques, carpològiques i de fitòlits. Cadascuna d'aquestes disciplines permet aprofundir en determinats



aspectes de l'estudi paleobotànic, i conjuntament permeten tenir una visió més completa de la vegetació en el passat. Dins d'aquest conjunt de disciplines s'ha de remarcar el "boom" que han experimentat els estudis en fitòlits en els darrers anys com a disciplina paleobotànica. De fet, més del 54% de les publicacions sobre fitòlits referenciades en el Science Citation Index són posteriors al 2001 (font: ISI Web of Knowledge).

Les investigacions en fitòlits permeten fer inferències que van més enllà de la reconstrucció paleobotànica. La quantificació dels fitòlits en els sediments arqueològics és una eina útil per fer aproximacions sobre el volum de matèria vegetal dipositada en el sediment. Les diferències a nivell morfològic i quantitatiu dels fitòlits ens donen dades sobre quines van ser les activitats que van dur a la formació d'aquestes acumulacions (Harvey i Fuller, 2005). Els fitòlits formen part dels sediments on es dipositen i conseqüentment sofreixen i enregistren totes les alteracions que actuen sobre aquests. Amb l'anàlisi del FTIR podem conèixer quins són els components minerals bàsics d'un sediment, i saber si han estat alterats o no. Aquesta informació ens ajuda a comprendre millor les condicions de preservació dels fitòlits, i en conseqüència saber quina és la qualitat de la informació que podem obtenir de l'anàlisi d'aquests.

Si bé és cert que els fitòlits poden ajudar a identificar el tipus d'activitat que s'ha realitzat en una zona en concret del jaciment, cap la possibilitat que els sediments on s'ha realitzat aquesta activitat siguin posteriorment remoguts, desplaçats o alterats per processos antròpics o naturals. El desplaçament dels sediments abans del seu enterrament o amb posterioritat no tan sols pot venir indicat pel tipus de fitòlits i la seva quantitat; altres elements com les diatomees o els esferòlits, que es poden observar amb facilitat durant la preparació de les mostres dels fitòlits, ens ajuden a interpretar aquests processos.

Tant els avanços en el camp dels processos de formació com les investigacions en el camp dels fitòlits es troben més àmpliament explicats en els capítols 3.1 i 3.2 del present treball.

La transversalitat entre les anàlisis de FTIR i de fitòlits, juntament amb el suport d'altres anàlisis botàniques i geoarqueològiques, ens permeten fer inferències sobre els processos de formació dels jaciments arqueològics, no només a nivell postdeposicional sinó també a nivell bioestratigràfic i conductual.

Aquesta tesi presenta un recull de publicacions en revistes i llibres de caràcter internacional en les que l'autor hi participa directament. Cadascun d'aquests treballs ha estat revisat de forma anònima per especialistes reconeguts internacionalment abans de la seva acceptació o la seva publicació. Tots els treballs tenen com a eix fonamental la utilització dels fitòlits i de tècniques complementàries, com el FTIR, per determinar tant els processos de formació dels jaciments estudiats com les implicacions paleobotàniques d'aquests microfòssils. El nucli central de la tesi està format pels treballs sobre els jaciments de l'Abric Romaní i de El Mirador. Realment és durant el treball de camp i durant l'anàlisi de les mostres d'aquests jaciments quan sorgeix la idea d'investigar els processos de formació arqueològics a través de l'anàlisi dels fitòlits. No obstant, per tal de poder entendre en la seva totalitat les implicacions de l'anàlisi dels fitòlits en aquests estudis era necessari contrastar els resultats obtinguts en aquests jaciments amb els resultats obtinguts en d'altres indrets. D'aquesta forma els treballs sobre la Gorja d'Olduvai i sobre Tel Dor ens ajuden a confirmar o invalidar les hipòtesis plantejades a partir de les investigacions realitzades a l'Abric Romaní i a El Mirador.

Tot i que l'essència d'aquesta investigació rau en l'Abric Romaní i El Mirador, per tal de facilitar el seguiment del discurs en aquesta tesi, la presentació dels jaciments segueix un ordre que depèn del grau d'antropització del jaciment i parcialment de la seva cronologia.

Això es deu a que dintre del conjunt de jaciments seleccionats el tipus i el grau d'antropització varia molt d'un als altres. Sóc conscient que l'escala temporal i espacial d'aquest conjunt de jaciments és molt extensa. Pel que fa a l'escala temporal, si el què es pretén és obtenir una visió dels diferents graus d'antropització és absolutament necessari recórrer un bon tram dintre de l'evolució i la història de la humanitat. Aquesta escala d'antropització està formada per 4 esglaons: en primer lloc s'ha buscat un jaciment on els processos de formació de caràcter antròpic siguin mínims o pràcticament inexistents, de tal forma que es pugui investigar els fitòlits dintre dels processos de formació més marcadament naturals. En la segona etapa de l'escala s'ha volgut augmentar la complexitat de la investigació i s'ha elegit un jaciment on la majoria dels processos de formació continuen essent naturals, però on els processos de formació antròpics hi són presents i són evidents; d'aquesta forma ens proposem investigar a partir dels fitòlits i les anàlisis mineralògiques quines són les relacions entre els processos de formació naturals i els antròpics, en un context relativament poc antropitzat. Per al tercer nivell es va cercar un jaciment on l'origen de la majoria dels sediments fos antròpic, però on el context de deposició fos en part natural; en aquest cas s'estudiaria com els fitòlits i les anàlisis mineralògiques ens poden donar informació sobre activitats humanes encobertes per processos de sedimentació també antròpics, i com els processos naturals poden alterar aquests sediments. Finalment es va escollir un jaciment on pràcticament la totalitat dels sediments i les restes estan directament relacionades amb les activitats humanes, així es pot investigar de forma directa les activitats que causen les acumulacions de fitòlits, i quin és el paper que juguen els processos naturals en jaciments completament antropitzats.

## 8

Quant a l'escala espacial l'elecció dels jaciments ha vingut determinada per factors com la presència de fitòlits en els dipòsits investigats, la disponibilitat d'estudi d'aquests jaciments, i sobretot per la rellevància dels mateixos.

Els articles sobre la Gorja d'Olduvai centren la nostra atenció sobre un tipus de jaciment a l'aire lliure i amb processos edafològics evidents. Si bé és cert que s'han recuperat tant restes humanes com les seves eines, considerem la formació dels llits I i II (en endavant Bed I i Bed II) com un sistema completament natural, on la influència humana sobre el conjunt de fitòlits recuperats resta en un segon pla.

En el treball de l'Abric Romaní es presenta un tipus de jaciment on l'antropització dels sediments és clara i evident. Tot i això, l'origen antròpic dels sediments del nivell J resta molt lluny de ser la font majoritària. Per tant, en el cas de l'Abric Romaní, tindriem un jaciment on els processos naturals i els processos antròpics es combinen, i fa que estiguin a mig camí entre el jaciment Africà i els següents.

El cas del jaciment de El Mirador és un grau més dintre d'aquesta escala d'antropització dels sediments. En aquest cas l'origen dels sediments és majoritàriament antròpic, però de forma indirecta, ja que gran part dels sediments dipositats tenen el seu origen en els fems del ramat establert en la cova. Amb tot, en el cas de El Mirador també s'han detectat processos que estan directament relacionats amb activitats humanes realitzades a la cova i que són diferents a l'establiment dels animals.

Finalment, en la part més alta de l'escala d'antropització hi ha el jaciment de Tel Dor. Aquí la major part del sediment és d'origen antròpic i si més no tot el context urbà ens indica fins a quin punt està antropitzat el jaciment. Això no significa però, com veurem més endavant, que no hi hagin processos postdeposicionals d'origen natural que afecten al contingut de fitòlits en el sediment.

## 1.1. Els jaciments

### 1.1.1. La Gorja d'Olduvai

La Gorja d'Olduvai és un dels jaciments més emblemàtics dintre del camp de l'evolució humana. Aquesta gorja, situada al nord de Tanzània, va ser investigada per primer cop al 1913 per Hans Reck, el qual va aportar fòssils que més tard atraurien l'atenció de Louis Seymour Bazett Leakey. Cap al 1935 el matrimoni format per Louis i Mary Leakey, tot i que ja havien fet alguna expedició a la zona, començà les visites regulars al jaciment durant les quals recuperen artefactes i ossos d'animals. Aquestes investigacions comporten el descobriment dels primers fòssils humans a la zona d'Olduvai; al 1955 apareixen les primeres troballes i al 17 de juliol de 1959 es recupera el crani de *Zinjanthropus boisei*, anomenat posteriorment *Paranthropus boisei*, i que permet atribuir les primeres restes localitzades a aquesta espècie (Constantino i Wood, 2007) (Figura 1). Entre el 1960 i 1973 es van excavar més jaciments dintre de la gorja, alguns dels quals van proporcionar més restes humanes. Els Leakey van revolucionar la paleoantropologia, no només per les restes recuperades a Olduvai, sinó perquè els seus treballs van encoratjar a d'altres investigadors per explotar altres jaciments de l'Àfrica oriental (Klein, 1999). En l'actualitat els treballs a la Gorja d'Olduvai han estat continuats per l'Olduvai Landscape Palaeoanthropology

10



Figura 1. Vista actual del *Zinj Site* on es van localitzar les restes de *P. Boisei* al 1959.

Fotografia: Xavier Esteve

Project (OLAPP), amb nous descobriments d'artefactes, fòssils humans i vertebrats (Marean *et al.*, 1992; Blumenschine, 1995; Blumenschine i Peters, 1998; Blumenschine *et al.*, 1999; Cushing i Blumenschine, 1999; Deocampo *et al.*, 2002; Blumenschine *et al.*, 2003; Bamford, 2005).

La Gorja d'Olduvai comprèn dues branques: la "Main Gorge" i la "Side Gorge". Les dues branques sumen una longitud de 50 km on estan exposats 100 metres de sediments lacustres, fluvials i eòlics dins d'una conca poc profunda. Els jaciments més importants se solen trobar on les torrenteres tallen les parets de la Gorja. Aquests jaciments s'anomenen seguint una combinació del nom swahili per a torrentera (Korongo) i el nom del descobridor (Frida Leakey Korongo = FLK) (Klein, 1999). Els dipòsits estan dividits en set unitats estratigràfiques successives i anomenades de baix cap a dalt: Bed I-IV, Masek Beds, Ndotu Beds i Naisiusiu Beds. La tova volcànica apareix en diversos nivells dintre de la seqüència, la qual cosa ajuda a mapar i correlacionar les unitats, però també permet datacions absolutes més precises. Aquestes datacions situen la seqüència d'Olduvai entre 2.03 milions d'anys abans del present i 15 mil anys a.p. Una descripció exhaustiva d'aquests dipòsits i les seves relacions es pot trobar a l'obra de Richard L. Hay (1976).

Els treballs que formen part d'aquesta tesi estan focalitzats en la part més alta de la Bed I (UMBI) i la part més baixa de la Bed II (LMBII). En aquests nivells s'han registrat les activitats d'homínids i carnívors a través de les restes de vertebrats, així com zones d'activitats dels primers homínids mitjançant la indústria lítica (Potts, 1988). Els jaciments de la Gorja d'Olduvai han proporcionat fòssils de *Paranthropus boisei*, *Homo habilis* (Bed I i la Bed II), *Homo ergaster* (Bed II, Bed III, Bed IV) i *Homo sapiens* (Masek i Ndotu Beds). La indústria lítica apareix al llarg de la seqüència, fins al punt de donar nom a una tradició lítica; l'Olduvaià o Mode 1. Així doncs, en la Bed I i la zona baixa de la Bed II apareix l'Olduvaià; l'Olduvaià evolucionat i l'Acheulià apareixen en la zona alta de la Bed II fins a la Bed IV. Les capes superiors presenten una successió del Acheulià fins al "Middle Stone Age" i el "Later Stone Age" (Klein, 1999). Pel que fa la UMBI i la LMBII no queda massa clar quin és l'homínid responsable de la manufactura de les eines; encara que inicialment Leakey va relacionar el *Paranthropus* amb la indústria lítica després va atribuir aquesta al *H. habilis*. Segons Constantino (2007) no hi ha una evidència ferma que permeti adjudicar l'autoria d'aquesta indústria al *Paranthropus*, però tampoc hi ha cap evidència que demostrï que aquests homínids no tinguessin la capacitat de fabricar eines.

S'ha de destacar que durant l'acumulació de la Bed I la conca d'Olduvai contenia un llac alcalí i salí poc profund, el nivell del qual fluctua més de 3 metres i el seu diàmetre varia entre 7 i 15 km. La majoria dels jaciments se situen en la costa sud del llac on l'aigua dolça de la zona volcànica drenava cap al llac. El llac va persistir durant la deposició de la zona més baixa de la Bed II fins a la deposició de la seqüència de toves eòliques. Una disconformitat sedimentària marca el final de la deposició de la Bed II i el principi de la deposició de la Bed III i l'inici d'un plegament i fallament generalitzat. Aquesta disconformitat també va associada a un canvi abrupte en la fauna, on molts dels taxons apareguts en les Bed I i II no desapareixeran i nous taxons arribaran a la zona. Les datacions per a la Bed I se situen entre 2.03 milions d'anys i els 1.75 m.a.; la UMBI es forma entre 1.80 i 1.75 m.a., per la qual cosa s'interpreta com a un període de canvi climàtic i ecològic relativament breu (Walter *et al.*, 1991). En canvi la Bed II es va formar entre 1.75 i 1.20 milions d'anys (Tamrat *et al.*, 1995; Klein, 1999).

Els climes del passat a Olduvai han estat inferits fins al moment per la representació proporcional dels sediments transportats pel vent, la composició isotòpica de l'oxigen i carboni dels carbonats del sòl, i les restes de vertebrats. Aquests mètodes poden aportar una visió molt

genèrica del paisatge dominant a la Gorja. Els resultats obtinguts a partir d'aquestes anàlisis indicarien que l'àrea d'Olduvai ha esdevingut més seca des de fa 2 milions d'anys fins ara, però aquesta tendència es va veure interrompuda per períodes més humits que correspondrien als interglacials de l'hemisferi nord. Durant la deposició de la part més alta de la Bed I es registra un canvi dramàtic de condicions humides a seques, i després un altre cop a humides.

Degut a les condicions de sedimentació dominants, la preservació pol·línica a la zona d'Olduvai és més aviat pobre. Amb tot, Bonnefille (1976) aconseguí extreure'n pol·len del 10% de les seves mostres. Els millors resultats els obtingué per a la Bed I i la Bed II. Durant la formació d'aquestes capes les condicions eren semiàrides i només van ser més àrides que en l'actualitat durant la transició entre ambdues capes. Aquesta investigadora demostra la coexistència de dos sistemes ecològics diferents que no sofreixen fluctuacions sincròniques. Un estaria format per un espai mosaic amb arbredes i clars, mentre que l'altre estaria caracteritzat per la selva montana. La presència de dues espècies d'homínids diferents en aquests nivells (*H. habilis* i *P. boisei*) fa pensar que cadascuna d'aquestes espècies ocuparia un nínxol ecològic diferent (Bonnefille, 1976). Però per poder fer una interpretació d'aquest tipus es requereix una reconstrucció més acurada a nivell espacial de la vegetació existent, i aquesta reconstrucció es pot dur a terme a partir de les anàlisis dels fitòlits. L'abundància dels fitòlits i de les macrorestes silificades en la Bed II va ser determinada per Hay (1976, pp. 72), el qual va aventurar que es podria tractar tant de fitòlits de poàcies com d'altres plantes degut a la seva varietat. L'estudi dels fitòlits a la Gorja d'Olduvai ens ha permès fer una reconstrucció paleoclimàtica acurada, però a més a més, com veurem més endavant, també ens permet entendre com funciona la deposició dels fitòlits en un medi on els processos de formació dominants són clarament naturals.

### 1.1.2. L'Abric Romaní

L'Abric Romaní representa una de les seqüències estratigràfiques clàssiques del Pleistocè superior del nord-est de la península Ibèrica. Situat en una zona de pas entre la Depressió Central catalana i la Depressió Prelitoral té un valor estratègic important per a les societats de caçadors recol·lectors del Paleolític Mitjà. Les primeres excavacions a l'Abric es van dur a terme fa aproximadament cent anys per Amador Romaní (Bartrolí *et al.*, 1995; Carbonell *et al.*, 1996) i en l'actualitat es continuen els treballs d'excavació a través del Grup d'Autoecologia Humana del Quaternari de la Universitat Rovira i Virgili.

La sedimentació de l'Abric es caracteritza per les formacions de travertins que acumulen més de 20 metres de sediments dividits en almenys 27 nivells (Carbonell *et al.*, 1996). Les sèries d'urani-tori situen la cronologia de la seqüència entre un interval que va dels 40 als 70 mil anys abans del present. El nivell J, que és el nivell estudiat en aquesta tesi, té una datació superior de  $49.3 \pm 1.6$  ka a.p. mentre que a la base tindria una antiguitat de  $50.0 \pm 1.6$  ka o  $50.8 \pm 0.8$  ka (Bischoff *et al.*, 1988). La major part dels sediments que reomplen la seqüència tenen el seu origen en la paret i el sostre de l'abric o bé en els processos de bioconstrucció, i la seva acumulació pot ser detrítica o química (Vallverdú, 2002). Cadascun dels principals nivells arqueològics està separat del nivell de dalt i del de sota per un nivell estèril. Aquests nivells estèrils es formaven durant el funcionament de l'Abric com una cascada, moment en el qual era inhabitable.

El tipus de sedimentació de l'Abric ha permès fer una reconstrucció paleoclimàtica d'alta resolució que ha convertit aquest jaciment en un model regional de referència per a l'estudi dels canvis climàtics dels estadis isotòpics 4 i 3 (Burjachs i Julià, 1994; Burjachs i Julià, 1996; Courty i Vallverdú, 2001). En aquest sentit el nivell J es va formar durant



Figura 2: Vista de la secció en excavació del fogar de O42, nivell J.

un període fred i sec amb oscil·lacions climàtiques d'uns 1.000 anys de durada. Segons Vallverdú (2002) el nivell J es pot notar un augment de l'activitat biològica a la part superior del nivell, que coincidiria amb l'expansió dels taxons arboris detectat pel pol·len (Burjachs i Julià, 1994). Així mateix, els resultats de l'estudi dels carbons ens indica que el taxó dominant és el pi roig, caracteritzat per créixer en condicions seques i fredes (Allué, 2002).

Una de les característiques més especials de l'Abric Romaní és que es tracta d'una excavació en extensió. Aquest fet permet fer inferències sobre l'organització espacial dels campaments mosterians, podent estudiar tota l'extensió que protegeix la cornisa de l'abric al mateix temps. Els estudis de l'organització espacial en aquest jaciment s'han basat sobretot en l'anàlisi de la indústria lítica (Vaquero, 1999), la fauna (Rosell, 2001; Cáceres 2002), la micromorfologia (Vallverdú, 2002) i la seva relació amb les restes de fogars (Vaquero i Pastó, 2001).

Els homínids que van habitar l'Abric Romaní durant la formació del nivell J es van adaptar a l'espai que hi van trobar. L'àrea ocupada estava configurada per la caiguda de grans blocs de la cornisa, els quals formen una barrera natural a l'entrada de l'abric, i pel paleorelleu format per la circulació hídrica en la base del nivell. En ocasions, però, els habitants de l'Abric Romaní adaptaven l'espai a les seves necessitats mobilitzant blocs i sediments (Carbonell *et al.*, 1996). El nivell J és un dels nivells que ha estat més intensament ocupat (Vaquero, 1997) i les activitats que s'hi van dur a terme, com la talla d'indústria lítica o el processament de carcasses animals, èquids i cèrvids sobretot, es van organitzar de forma jeràrquica a partir de la distribució dels fogars. Aquests fogars poden presentar una morfologia plana durant l'excavació i estar aïllats els uns dels altres, o bé es poden solapar degut a la intensitat de l'ocupació (Figura 2). També en el mateix nivell podem trobar fogars delimitats amb blocs que en resulten de la complexitat organitzativa dels habitants de l'abric (Pastó *et al.*, 2000). Dintre del sistema sedimentari de l'Abric Romaní els fogars són un exponent clar d'un procés de formació antròpic, que no tan sols aporta sediments (cendres) sinó que a més altera els sediments i les restes arqueològiques

a través de l'impacte tèrmic. Entendre els processos de formació a l'Abric Romaní passa per entendre com van funcionar els fogars al nivell J i quines van ser les alteracions que van sofrir i que han modificat les seves restes fins al moment de l'excavació.

### 1.1.3. La Cueva de El Mirador

El Mirador s'excava des del 1999 i es troba situat dintre del complex de jaciments de la Sierra de Atapuerca, en la vessant meridional d'aquesta serra, a uns 15 km a l'est de la ciutat de Burgos. La Sierra de Atapuerca ha proporcionat ocupacions humanes des de fa 1,3 milions d'anys fins pràcticament l'actualitat (Rodríguez *et al.*, 2001; Carbonell *et al.*, 2008). Fins al moment al jaciment de El Mirador s'ha realitzat una cala de 6 metres quadrats que ha permès descobrir nivells de l'Edat del Bronze, del Neolític (Figura 2) (Vergès *et al.*, 2002) i un petit nivell del Paleolític Superior. En aquesta tesi presentem l'estudi del nivell 4, que forma part dels nivells de l'Edat del Bronze i les característiques del qual queden descrites en el capítol 6.1.

En aquest jaciment les restes de fauna recuperades indiquen un predomini dels animals domèstics en tota la seqüència, encara que en alguns nivells del neolític es pot donar una explotació mixta dels recursos faunístics, apareixent d'aquesta forma restes d'animals salvatges caçats pels humans (Martín, 2007). La indústria lítica és escassa a l'igual que el material ceràmic (Vergès *et al.*, 2002). L'estudi dels micromamífers al Mirador mostra un ambient de bosc obert i mixt durant la seqüència holocènica del jaciment (López, 2006). Per als nivells neolítics les anàlisis pol·líniques ens descriuen un paisatge boscós, amb taxons termòfils i humits, però també amb espais oberts que progressivament van agafant més importància i els quals poden estar dominats per cultius de cereals o per pastures (Expósito, 2007). L'augment de l'activitat antròpica a l'àrea del jaciment també ha estat determinat a partir de les anàlisis antracològiques; aquestes mostren com la intensificació de l'activitat humana afecta a les formacions de roures i com progressivament les alzines agafen protagonisme (Allué i Euba, 2008). Els cereals, principalment blat i ordi, no eren les úniques plantes conreades, ja que també s'ha constatat la importància de les lleguminoses al llarg de la seqüència (Rodríguez, 2005).

Tant les restes arqueològiques com el tipus de sediment que s'hi ha trobat fan pensar que la cova de El Mirador va funcionar principalment com a lloc per estabular animals durant el Bronze i el Neolític. Estabular el bestiar en la cova fa que al llarg del temps es vagin acumulant els excrements d'aquest. Periòdicament els sediments són cremats per tal d'eliminar els paràsits i per reduir el volum dels fems, això fa que augmenti dràsticament la variabilitat en la textura i el color dels sediments. Degut a aquesta variabilitat dels sediments durant el procés d'excavació es van definir un llistat de fàcies que agrupen les variacions més comuns en les característiques sedimentàries. Aquestes fàcies s'apliquen a tots els nivells holocens, la qual cosa ens permet evidenciar diferències sedimentàries dintre d'un mateix nivell arqueològic i també ens permet comparar fàcies idèntiques de diferents nivells. Aquest tipus de seqüències és força habitual en tot el Mediterrani occidental durant aquest període, però molt sovint aquests jaciments no servien només com a llocs d'estabulació dels animals i s'hi realitzaven altres activitats de tipus domèstic (Brochier *et al.*, 1992; Boschian, 1997; Macphail *et al.*, 1997; Badal, 1999; Boschian i Montagnari-Kokelj, 2000; Alday *et al.*, 2003; Karkanas, 2006). Aquest també és el cas del jaciment



de El Mirador on es va poder recuperar un enterrament secundari de sis individus, datat de l'Edat del Bronze, als quals se'ls hi havia practicat canibalisme de tipus gastronòmic (Cáceres *et al.*, 2007).

L'origen principal dels sediments que formen el nivell 4 del Mirador, és a dir els fems, fa que sigui un nivell idoni per realitzar un estudi de fitòlits i també de FTIR. Els excrements de ruminants tenen un alt contingut en fitòlits i també una alta presència de fosfats, això fa que tant la quantificació dels fitòlits com l'anàlisi del FTIR sigui necessari per entendre com es

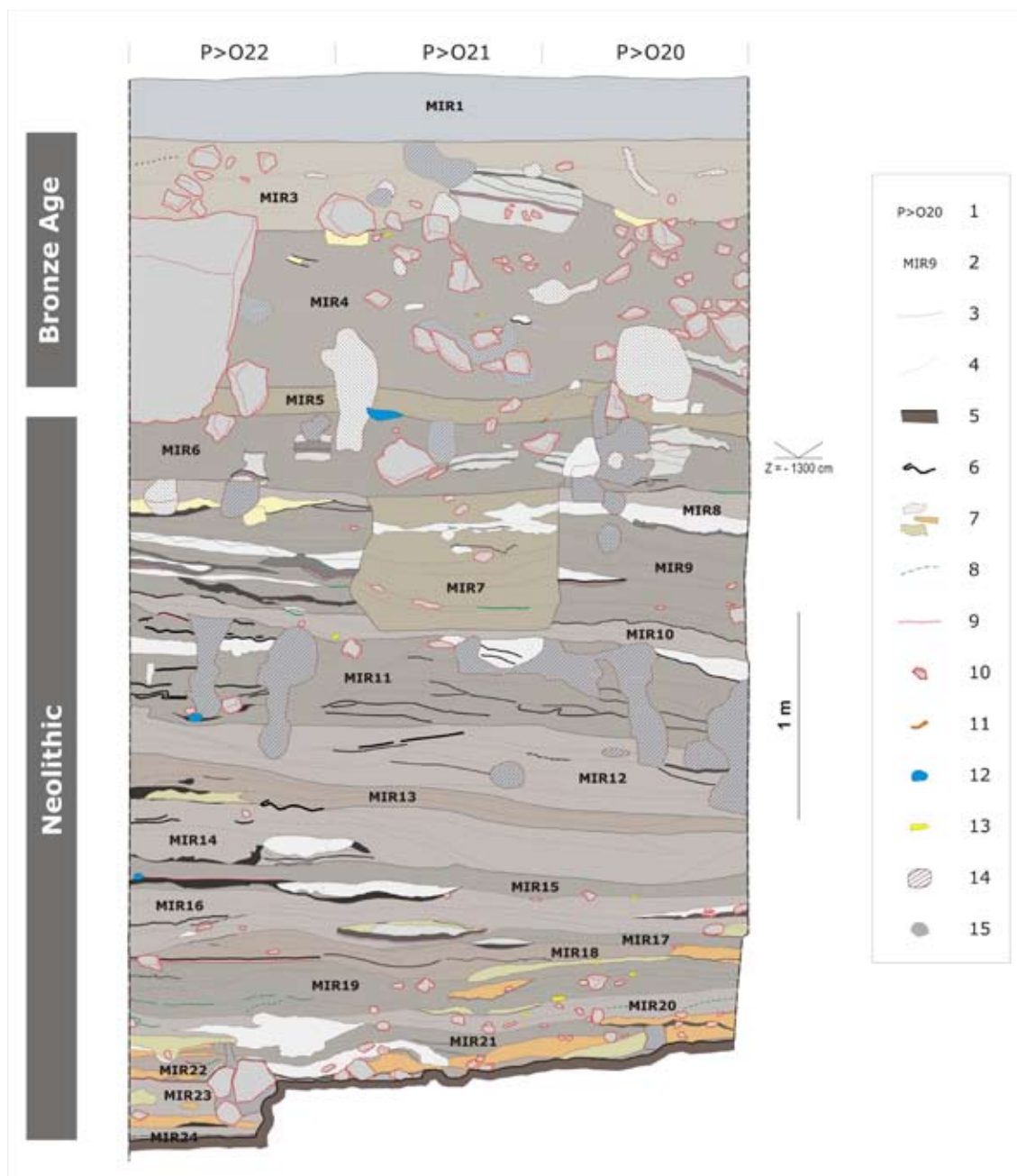


Figura 3. Estratigrafia Holocena de El Mirador. Secció de la seqüència Holocena. Mur Sud de la cala. Extreta de Carrancho *et al.* en preparació, realitzada i cedida per D. E. Angelucci.

Clau: 1 - quadres; 2 - nom dels nivells; 3 - Límits dels nivells; 4 - Límits de les fàcies; 5 - Límit superior de la seqüència Pleistocena; 6 - acumulacions de carbons; 7 - acumulacions de cendres (diferents fàcies); 8 - nivell de cendres; 9 - sediment cremat (rubefacció); 10 - fragments de calcària; 11 - padellassos (en. potsherds); 12 - artefactes lítics; 13 - ossos; 14 - caus subactuals; 15 - caus antics.

dipositen els sediments i quina és la seva evolució postdeposicional. A més a més, les diferències entre tipus de fitòlits, quantitat de fitòlits, composició química i altres elements ens permeten fer inferències sobre el tipus d'ocupació que es va donar en la cova i quines activitats domèstiques s'hi van desenvolupar, a part de l'establiment dels animals.

#### 1.1.4. Tel Dor

Tel Dor és un jaciment urbà situat a la costa nord d'Israel (Figura 4), al sud del Mont Carmel. Els 20 anys d'excavació han donat una detallada successió estratigràfica on les primeres fases d'ocupació se situen en l'Edat del Bronze Mitjà IIA (ca 2000-1750 abans de la nostra era) (Gilboa i Sharon, 2003; Shahack-Gross *et al.*, 2005) i acaben durant les creuades (Berna *et al.*, 2007). El jaciment s'identifica com a D-jr en els textos egipcis del segon mil·lenni a.n.e. o com el Dor bíblic, o bé el Dora grecoromà (Berna *et al.*, 2007). Els primers habitants de Dor són identificats com un dels pobles del mar anomenat SKL (Gilboa, 2005; Stern, 1998), encara que posteriorment la ciutat serà destruïda i ocupada pels fenicis, els quals construeixen nous edificis, sovint seguint noves ordenacions urbanístiques (Gilboa, 1998). A Tel Dor s'identifiquen dues fases que es poden atribuir als SKL, la primera de les quals data de la primera meitat del segle XII a.n.e. i la segona de la segona meitat del segle XII fins a mitjans del segle XI quan arriba l'ocupació fenícia (Stern, 1998).

16



Figura 4: Vista del jaciment de Tel Dor durant la campanya d'excavació

Abans de la construcció del port romà de Caesarea, les badies naturals de Dor eren un dels pocs punts resguardats en la costa oriental del Mediterrani, la qual cosa va permetre el desenvolupament del centre urbà. A més a més, sembla ser que el port de Dor comptava amb les instal·lacions suficients per esdevenir un centre comercial important

i es realitzaven les obres necessàries per mantenir la viabilitat de les bocanes naturals (Raban, 1998). El paper com encreuada comercial és més propi de la Primera Edat del Ferro (Early Iron Age). Durant aquesta època, tot i que la majoria del Mediterrani occidental estava sumit en l'Edat Fosca (Dark Age), Dor mostra certs luxes i contactes amb Filistea, Xipre, Egipte i d'alguna forma amb Grècia. A més a més, té una arquitectura urbana densa, així com construccions públiques de caire monumental (Stern, 1998).

En els darrers anys s'han multiplicat les investigacions de caire més tècnic i que impliquen resultats d'alta resolució al jaciment de Tel Dor. D'aquesta forma s'han dut a terme una sèrie d'estudis que impliquen les anàlisis de fitòlits, de FTIR i de micromorfologia dels sòls. Quant a la utilització del FTIR, Berna *et al.* (2007) van determinar com s'alteren les argiles dels sediments a partir dels impactes tèrmics, mentre que Chu *et al.* (2008) van diferenciar entre la calcita provinent de les cendres i la calcita natural a través del desordre cristal·lí d'aquest mineral calculat amb els espectres del FTIR. Pel que fa als fitòlits i a la micromorfologia les primeres investigacions dutes a terme van reorientar la interpretació del conjunt monumental fenici de Tel Dor, ja que sorprenentment els resultats d'aquest treball van apuntar a que en l'edifici públic estudiat s'hi havia establert ramat (Shahack-Gross *et al.*, 2005). En aquest cas es va demostrar l'existència de capes riques en fitòlits que estaven relacionades amb l'establiment d'animals i la presència d'una diagènesi intensa que fa variar el volum dels sediments.

L'alt contingut en fitòlits d'algun dels nivells del jaciment fa que l'anàlisi d'aquests sigui necessari per a poder interpretar l'ús de l'espai domèstic durant el Bronze final i la Primera Edat del Ferro en els emergents nuclis urbans de l'Orient Mitjà. La utilització del FTIR ens permet conèixer l'estat de preservació dels sediments que contenien aquests fitòlits i en part com han evolucionat a nivell postdeposicional, i, si es dóna el cas, com afecta això a la distribució de les restes arqueològiques. Entendre l'ús de l'espai domèstic és entendre també com es va formar el jaciment, però a més a més, l'anàlisi de la resta de capes que no estan directament relacionades amb l'ocupació permet discutir l'evolució tafonòmica de les restes recuperades.

Els jaciments estudiats en aquesta tesi s'han d'entendre com l'oportunitat de realitzar quatre experiments, cadascun dels quals, com hem vist abans, s'ha programat amb unes variables que els caracteritzen de forma individual. Aquests "experiments" ens han de permetre posar a prova la capacitat dels fitòlits com a eina per estudiar els processos de formació d'un jaciment arqueològic. Les diferències entre els jaciments ens dóna un avantatge per explorar les nostres hipòtesis en quatre condicions distintes. En definitiva, pensem que els resultats d'aquesta aproximació, a través dels fitòlits, FTIR i altres observacions, ens han millorat l'Arqueologia com a ciència i han augmentat el coneixement del nostre passat.

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI

L'ESTUDI DELS PROCESSOS DE FORMACIÓ DELS SEDIMENTS ARQUEOLÒGICS

I DELS PALEOSÒLS A PARTIR DE L'ANÀLISI DELS FITÒLITS , ELS MINERALS I ALTRES MICRORESTES

Dan Cabanes i Cruelles

ISBN:978-84-692-1535-7/DL-T-378-2009

## **2. Hipòtesis i objectius**

19

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI

L'ESTUDI DELS PROCESSOS DE FORMACIÓ DELS SEDIMENTS ARQUEOLÒGICS

I DELS PALEOSÒLS A PARTIR DE L'ANÀLISI DELS FITÒLITS , ELS MINERALS I ALTRES MICRORESTES

Dan Cabanes i Cruelles

ISBN:978-84-692-1535-7/DL-T-378-2009

Una interpretació apropiada del passat a partir de les restes arqueològiques depèn d'una contextualització adient d'aquestes restes. Aquesta contextualització està estretament lligada a la identificació dels processos de formació arqueològics, els quals són a la vegada responsables de la configuració final del registre arqueològic. Entendre els processos de formació d'un jaciment és un pas imprescindible dins de la recerca arqueològica actual. Millorar la qualitat de la informació obtinguda en l'anàlisi del registre implica millorar les disciplines que estudien els processos de formació, o si més no, aplicar noves aproximacions al problema de la formació dels jaciments. El present treball representa una nova forma d'estudiar els processos de formació arqueològics amb l'objectiu de millorar el coneixement del passat.

La nostra hipòtesi de partida és la següent: La combinació de les anàlisis de fitòlits amb les anàlisis de FTIR i altres elements microscòpics és una eina capaç d'aportar informació sobre els processos de formació arqueològics, i d'aquesta forma es pot millorar el coneixement del nostre passat. Per tal de validar o rebutjar aquesta hipòtesi s'han estudiat principalment dos jaciments: L'Abric Romaní i El Mirador. L'aplicació dels estudis de fitòlits, FTIR i altres restes microscòpiques en aquests jaciments ens hauria d'indicar la viabilitat d'utilitzar aquesta aproximació per a estudiar els processos de formació. Per tal d'ampliar el tipus de jaciments sobre el que estem validant aquesta hipòtesi també s'han utilitzat els resultats obtinguts a Olduvai i a Tel Dor. Les diferències evidents en el tipus de jaciment, els processos de formació dominants, i el grau d'antropització d'aquests quatre indrets ens ha de confirmar si el nostre plantejament es pot aplicar a qualsevol jaciment arqueològic independentment de les seves característiques, i sempre i quan els fitòlits s'hagin preservat en nombre suficient.

Els objectius que es pretenen assolir en el present treball es divideixen en objectius generals i objectius concrets per cada jaciment.

### **Objectius generals**

1. Determinar els processos de formació identificables a partir d'aquesta aproximació, i al mateix temps, identificar l'agent causant d'aquests processos i com afecten al registre dels fitòlits. Així doncs, es diferenciarien els processos de formació antròpics dels processos de formació naturals a partir del contingut de fitòlits en els sediments; en conseqüència, un primer pas per poder assolir aquest objectiu és distingir entre els fitòlits que tenen un origen natural en els sediments i aquells fitòlits que tenen un origen cultural o antròpic. També es provarà de distingir entre els processos postdeposicionals que alteren o canvien el conjunt de les restes i els processos bioestratigràfics, o previs a l'enterrament, els quals poden tenir una relació directa amb les activitats humanes: aquestes activitats, que fins al moment s'han determinat principalment seguint les restes macroscòpiques, s'intentaran definir ara a partir de les restes microscòpiques.
2. Definir els avantatges i les limitacions de l'aplicació dels estudis de fitòlits als processos de formació: entendre quins són els límits és molt important a l'hora de poder interpretar els resultats obtinguts, d'aquesta manera s'ha de delimitar de forma conscient quines són les possibilitats d'aplicar els fitòlits a l'estudi dels processos de formació per no fer interpretacions errònies. Els resultats obtinguts amb l'anàlisi dels fitòlits i del FTIR es compararan amb els obtinguts per altres disciplines pels mateixos jaciments. D'aquesta forma es determinarà el grau de fiabilitat que té la combinació de fitòlits i FTIR a l'hora d'investigar els processos de formació.
3. Finalment, el darrer objectiu general és entendre els aspectes metodològics. L'estudi dels fitòlits és una disciplina que fins al moment s'ha emmarcat sobretot dins de l'àmbit de la paleobotànica o l'arqueobotànica. Aplicar aquesta disciplina a l'estudi dels processos de formació comporta definir de nou aspectes metodològics que poden influenciar a l'hora d'obtenir resultats o interpretar-los. En aquest treball es definiran aquestes variacions en la metodologia habitual que s'han d'aplicar a l'estudi dels fitòlits per poder-los utilitzar en la investigació dels processos de formació.

22

### **Objectius per jaciments**

#### **La Gorja d'Olduvai**

Amb la inclusió dels estudis realitzats a la Gorja d'Olduvai en aquesta tesi es pretén entendre com funciona la deposició dels fitòlits en un medi natural i veure quines implicacions té això en l'estudi dels processos de formació. Per tal d'aconseguir aquest propòsit s'han plantejat una sèrie d'objectius bàsics, que aplicats en aquest jaciment, ens permetran complementar la informació obtinguda en els altres jaciments (L'Abric Romani i El Mirador) a l'hora d'estudiar els processos de formació. Així doncs, els objectius concrets que ens plantegem en el cas d'Olduvai són els següents:



1. Definir com s'ha format el registre dels fitòlits que s'ha preservat fins a l'actualitat: per tal d'aconseguir això en primer lloc s'ha d'entendre quina és la producció de fitòlits en les plantes i quins són els fitòlits que es preserven en els sòls actuals: coneixent aquests factors podem identificar quins són els efectes dels agents bioestratinòmics o bé quines són les conseqüències dels processos tafonòmics de caire immediat, és a dir, tindrem una imatge de com haurien de ser els sòls del passat sense que hagin sofert els processos postdeposicionals que poden alterar el conjunt de fitòlits inicial. L'obtenció d'una col·lecció de referència de les plantes i dels sòls actuals ens ajuda a entendre la vegetació del passat, però també quines són les lleis que regeixen la deposició natural dels fitòlits en els sediments.
2. Entendre els processos tafonòmics que afecten al conjunt de fitòlits, a partir de la comparació entre mostres actuals i mostres paleontològiques, tenint en compte els resultats del FTIR; d'aquesta forma s'hauria de poder distingir com afecten els processos tafonòmics a la formació del jaciment.
3. Els dos primers objectius ens permetran identificar la capacitat de la preservació dels fitòlits en els paleosòls i veure quines són les morfologies més resistents o quins biaixos tafonòmics hem d'esperar independentment de l'estat de preservació dels sediments.
4. L'objectiu final a Olduvai és realitzar una interpretació paleoclimàtica tenint en compte tots els elements que s'han plantejat anteriorment. Per realitzar aquesta interpretació és completament necessari entendre com es va formar el jaciment, i sobretot, com es va formar el registre de fitòlits que estem estudiant.

### **L'Abric Romaní**

L'objectiu fonamental a l'Abric Romaní és identificar i definir processos de formació antròpics, a través de l'estudi dels fitòlits i del FTIR, en un medi dominat pels processos de formació naturals. Un dels elements més marcadament antròpics del nivell J, i que a més té moltes possibilitats de contenir fitòlits, són les restes dels fogars que els antics habitants de l'abric van utilitzar durant els períodes d'ocupació. És per això que els objectius més concrets de l'Abric Romaní se centren en aquests fogars:

1. Entendre com van funcionar aquests fogars i quines són les empremtes que deixen en el registre sedimentari de forma immediata. Per això cal determinar el combustible principal emprat en aquests fogars per conèixer quines són les activitats que van provocar la formació del registre sedimentari antròpic que estem estudiant, és a dir les cendres, els microcarbons i els sediments alterats tèrmicament.
2. Determinar si la intensitat de l'ocupació del nivell J de l'Abric Romaní ha implicat l'aparició de processos bioestratinòmics o postdeposicionals de caire cultural, com ara el solapament de diferents fogars o bé el desplaçament de les cendres i els residus de combustió per part dels mateixos habitants de l'abric.

3. Definir com els processos de formació naturals de caire postdeposicional poden afectar el registre dels fitòlits en els fogars, i com això afecta als sediments antròpics i no antròpics que formen el nivell J.
4. Finalment, i dintre de la dicotomia entre sediments antròpics i sediments naturals, s'intentarà definir quina és l'aportació antròpica en termes de fitòlits i quina és l'aportació natural que és pot identificar en els sediments dels fogars de l'Abric Romaní.

### **El Mirador**

L'objectiu principal de l'estudi a El Mirador és caracteritzar els processos de formació antròpics a través dels fitòlits, el FTIR i altres microrestes, i com aquests elements es poden veure afectats per processos tafonòmics d'origen natural. En un jaciment com El Mirador, on els processos de formació dominants són de caire antròpic, però d'alguna manera de forma indirecta, ens plantejem una sèrie d'objectius concrets que són:

1. Caracteritzar cadascuna de les fàcies estudiades al nivell 4 a partir de les seves restes botàniques i la seva mineralogia. Amb això, es vol determinar, si la diferenciació en fàcies realitzada durant el procés d'excavació del jaciment correspon amb un determinat espectre de fitòlits, o pel contrari si el contingut en fitòlits no depèn directament del tipus de fàcies estudiada.
2. Determinar si l'alta variabilitat sedimentària està relacionada amb l'origen dels sediments o bé, si aquesta variabilitat es deu als processos postdeposicionals que afecten als sediments un cop dipositats. Per tal d'assolir aquest objectiu s'intentarà determinar quines són les activitats que originen l'acumulació sedimentària i quins són els processos postdeposicionals que afecten als sediments.
3. Finalment, i davant l'oportunitat que ofereix una seqüència com la de El Mirador, es determinarà la relació existent entre els fitòlits i altres microrestes, com ara els esferòlits o els oxalats de calci, així com les interpretacions que se'n poden extreure en termes de processos de formació.

### **Tel Dor**

Les característiques del jaciment de Tel Dor, un jaciment on les activitats antròpiques representen la majoria dels processos de formació, ens han de servir per entendre millor les implicacions dels fitòlits en l'estudi dels processos de formació en un jaciment completament antropitzat, i a partir d'aquí reforçar les hipòtesis que se'n poden extreure de les investigacions a l'Abric Romaní, i sobretot a El Mirador. Per tal d'assolir l'objectiu principal proposem una sèrie d'objectius concrets que es poden aplicar al jaciment de Tel Dor:

1. Definir com es van formar les capes riques en fitòlits i quins processos tafonòmics han sofert, ja que aquests últims poden afectar a l'estratigrafia i a la disposició general de les restes.

2. Caracteritzar la relació dels fitòlits amb altres restes microscòpiques, com ara els esferòlits, així com la relació de l'espectre de fitòlits amb el medi sedimentari que els envolta.
3. Comprendre la gestió dels recursos vegetals i dels recursos animals en relació als espais estudiats a partir de l'anàlisi dels fitòlits. Determinar el contingut en fitòlits, i diferenciar les plantes cultivades de les que no ho són és indispensable per entendre la utilització de l'espai en un àmbit urbà com el de Tel Dor.
4. Donar suport a les interpretacions realitzades a El Mirador a través de la comparació amb els resultats obtinguts a Tel Dor. Ens plantejem comparar en aquest últim jaciment les dades obtingudes a través dels fitòlits amb les dades obtingudes per altres disciplines, com ara la micromorfologia dels sòls, ja que d'aquesta forma es poden fer analogies entre els resultats obtinguts a Tel Dor i els resultats obtinguts a El Mirador.

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI

L'ESTUDI DELS PROCESSOS DE FORMACIÓ DELS SEDIMENTS ARQUEOLÒGICS

I DELS PALEOSÒLS A PARTIR DE L'ANÀLISI DELS FITÒLITS , ELS MINERALS I ALTRES MICRORESTES

Dan Cabanes i Cruelles

ISBN:978-84-692-1535-7/DL-T-378-2009

### **3. Marc teòric**

27

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI

L'ESTUDI DELS PROCESSOS DE FORMACIÓ DELS SEDIMENTS ARQUEOLÒGICS

I DELS PALEOSÒLS A PARTIR DE L'ANÀLISI DELS FITÒLITS , ELS MINERALS I ALTRES MICRORESTES

Dan Cabanes i Cruelles

ISBN:978-84-692-1535-7/DL-T-378-2009

### 3.1. Els processos de formació

29

Els objectes recuperats durant les excavacions arqueològiques no van ser dipositats tal i com els hem trobat, les restes arqueològiques es poden desplaçar, i fins i tot poden arribar a desaparèixer (Goldberg *et al.*, 1993). Entendre quins són els agents que formen una acumulació arqueològica, i quins són els elements que permeten la seva conservació, modificació o destrucció és indispensable per poder interpretar el conjunt arqueològic. Schiffer (1972) es pregunta perquè hi ha un registre arqueològic; la resposta a la seva pregunta és perquè existeixen els processos de formació dels jaciments arqueològics.

L'estudi dels processos de formació arqueològics és, entre d'altres coses, l'estudi del comportament humà que condueix a la formació d'aquest registre arqueològic. No obstant, molts cops s'obvia aquest fet i hom engloba dins del terme "processos de formació" només aquells processos que preserven o alteren la disposició original del registre arqueològic (Stein, 2001). Entenem doncs, com a processos de formació arqueològics, tots aquells processos que permeten la formació d'un jaciment i la seva conservació, alteració o destrucció, ja siguin d'origen natural o d'origen antròpic.

Així doncs, l'estudi dels processos de formació d'un jaciment arqueològic implica aportar informació sobre com es va produir la deposició de les restes, quins patrons de conducta van influenciar en aquesta deposició, quines són les condicions que han permès la preservació del registre, i quins van ser els agents que el van modificar o destruir.

Conèixer els processos de formació d'un jaciment és essencial per tal d'entendre el registre arqueològic en tots els seus aspectes, incloent-hi les inferències sobre el comportament humà en el passat (Goldberg i Bar-Yosef, 1998). A més a més, la determinació dels processos de formació ens permetrà definir en quina escala temporal es pot treballar, o bé com es pot adaptar l'estratègia d'excavació als problemes específics de cada jaciment (Texier, 2000).

### 3.1.1. Antecedents i formació del corpus teòric

Els precedents dels primers estudis sobre els processos de formació, tal i com els entenem ara, se situen als anys 50 i 60 del segle passat. Dins del context dels estudis processuals i d'assentament s'intenta extreure'n el màxim d'informació social i conductual de les restes recuperades. D'aquesta manera, les activitats humanes que produeixen un registre arqueològic van esdevenir un dels primers focus d'atenció (Schiffer, 1983).

No és però fins l'arribada de la "Nova Arqueologia" quan els processos de formació arqueològics esdevenen un tema de debat i un problema a resoldre. La "Nova Arqueologia", de forma quelcom ingènua, planteja uns comportaments que són comuns a totes les persones a partir dels quals sorgeixen uns processos de formació que poden ser identificats en els jaciments arqueològics (Stein, 2001). Així doncs, els primers intents d'estudiar els processos de formació es van centrar en l'estudi de patrons conductuals que produeixen un determinat tipus d'associació o disposició d'artefactes. Interessa sobretot saber com s'arriba a aquestes associacions, és a dir, quins són els motius pels quals els artefactes acaben la seva vida útil, són descartats, i passen a formar part del registre arqueològic. Però sobretot interessa saber com s'interpreten els patrons arqueològics en termes culturals i de comportament (Binford, 1962). No obstant, aviat es va tenir consciència de que hi ha agents, naturals o antròpics, que poden alterar els patrons arqueològics. Això, si més no, va frenar l'entusiasme desfermat amb la Nova Arqueologia i la interpretació directa del registre arqueològic (Schiffer, 1983).

Als finals dels 70 i principis dels 80 la majoria dels investigadors i teòrics estan d'acord en que els processos de formació són un agent de màxima importància per a poder interpretar el registre arqueològic (Binford, 1981; Schiffer, 1987; Butzer, 1989). És dins d'aquest context on destaca l'obra de Michael Brian Schiffer, sobretot pel seu aspecte teòric i les definicions dels conceptes que s'utilitzen en l'estudi d'aquests casos.

En el seu article *Archaeological Context and Systemic Context* (Schiffer, 1972) defineix els conceptes bàsics que permeten fer la interpretació dels patrons de comportament humà a partir de les restes arqueològiques. Aquests conceptes són: el context sistèmic i el context arqueològic. El context sistèmic està format per les activitats en les que un element participa durant la seva vida útil, activitats com el procurament, la manufactura, etc. Com que cada activitat es desenvolupa en un lloc en concret i utilitza uns objectes determinats, hi haurà uns llocs específics on la probabilitat de trobar un element determinat és més alta. El context sistèmic, en definitiva, ens



explica quines activitats són les responsables de la formació del registre arqueològic. El context arqueològic ens descriu els materials que han passat per un sistema cultural i ara són objectes d'investigació dels arqueòlegs, en altres paraules, el registre arqueològic.

Ara bé, s'ha d'entendre també com els artefactes passen d'un context sistèmic a un context arqueològic, per això és important saber si els objectes són desestimats en el lloc on es van utilitzar (refús primari) o bé van ser abandonats en un altre lloc (refús secundari), o fins i tot si van ser abandonats sense realitzar cap acció específica (refús *de facto*) (Schiffer, 1972).

Pel que fa als processos de formació que alteren el registre arqueològic Schiffer (1983) defineix els conceptes de "entropia", "mostreig esbiaixat" i de "transformació".

El concepte d'*entropia* fa referència a la disminució de la qualitat de la informació a mesura que passa el temps des de que les restes arqueològiques han estat dipositades. Deixa clar, però, que no és el pas del temps *per se* el que provoca l'alteració del registre; l'entropia s'origina per processos específics que poden afectar de forma diferent a conjunts que s'han format durant el mateix període. Per això, els estudis dels processos de formació s'han d'aplicar cas per cas i no de forma generalitzada. A més a més, s'ha de tenir en compte que dels dipòsits mal preservats encara se'n pot extreure'n informació i per tant no es poden descartar.

El concepte del *mostreig esbiaixat* implica que no tots els artefactes es conserven de forma igual en el registre: és a dir, que els processos de destrucció del registre no tan sols afecten al nombre de restes arqueològiques sinó que també afecten al tipus de resta arqueològica que es conserva. Això suposa doncs, que els processos de formació funcionen seguint una sèrie de patrons que poden ser identificats. Entendre que els processos de formació poden tenir un efecte de biaix és comprendre que tenen conseqüències predictibles que poden ser descrites per lleis (Schiffer, 1983).

Finalment el concepte de *transformació* fa referència a aquells elements que distorsionen els patrons d'artefactes, un cop aquests s'han dipositat. Aquesta transformació fa que l'arqueòleg no pugui interpretar directament el comportament humà a partir de les associacions que es troben en un jaciment, ja que aquestes poden estar alterades. Aquestes transformacions, però, exhibeixen regularitats que poden ser definides com a lleis, i per tant la distorsió que causen es pot rectificar utilitzant les eines adients (Schiffer, 1995).

### **3.1.2. Tipus de processos de formació: processos de formació naturals i processos de formació antròpics**

La gènesi dels jaciments arqueològics implica nombrosos processos de formació que poden actuar en diferents escales temporals o simultàniament. La variabilitat dels processos de formació pot fer difícil la seva identificació i, fins i tot, pot alterar els rastres dels processos

més antics. Identificar i aïllar, en la mesura del possible, cadascun d'aquests processos i les seves empremtes és imprescindible per a poder realitzar inferències arqueològiques amb un mínim de qualitat.

Stein (2001) diferencia tres tipus essencials de processos de formació: els processos culturals que són els responsables de l'origen de l'acumulació de restes antròpiques; els processos culturals contemporanis a la deposició del registre que afecten a la disposició i preservació d'aquest, i finalment; els processos naturals que modifiquen o conserven el registre arqueològic.

En definitiva, però, tenim dos grans tipus de processos de formació: Els processos de formació naturals i els processos de formació antròpics. Segons Schiffer (1987) els processos antròpics són aquelles activitats humanes que afecten o transformen els artefactes després del seu període inicial d'ús durant una determinada activitat, mentre que els processos de formació naturals són aquells processos de l'ambient natural que incideixen en els artefactes o els dipòsits arqueològics.

El naixement d'un jaciment arqueològic només es pot produir a partir dels processos de formació antròpics (o culturals). En altres paraules, en tots els jaciments arqueològics s'han recuperat restes que, de forma directa o indirecta, són fruit de l'activitat humana. Sense aquesta activitat antròpica no pot haver-hi jaciment arqueològic ja que no entraria dintre de la pròpia definició de registre arqueològic. Aquesta activitat pot quedar enregistrada de formes molt diverses, algunes de les quals, no es poden identificar directament durant l'excavació i només es poden observar en el procés d'estudi dels materials. En alguns jaciments, per exemple, pot ser que pràcticament no tinguem indústria lítica però tenim les marques de tall que van produir les eines de pedra (Rosas *et al.*, 2001; Hugué, 2007). En d'altres no trobem les cendres ni els carbons, però podem detectar els fogars a partir de la presència de microrestes vegetals (Schiegl *et al.*, 1996; Albert *et al.*, 2000). En canvi, hi ha altres jaciments que estan formats bàsicament per sediments d'origen antròpic o sediments acumulats de forma intencional, com ara els Tells del pròxim orient o els fumiers del Mediterrani (Brochier *et al.*, 1992; Brochier, 2002; Shahack-Gross *et al.*, 2005; Karkanas, 2006; Berna *et al.*, 2007). Fins i tot, hi ha jaciments on les característiques d'una acumulació aparentment paleontològica (o d'origen natural) ens donen informació sobre les activitats humanes que causen aquesta acumulació (Arsuaga *et al.*, 1997). En aquest sentit, s'ha de distingir clarament entre el que pot ser un jaciment arqueològic (caracteritzat per les restes de l'activitat humana) i un jaciment paleontològic (on poden haver-hi restes humanes però no restes de les seves activitats). S'ha de tenir en compte però que en alguns jaciments arqueològics hi ha elements tan abundants com els ossos o el guano, que en part o totalment han estat acumulats per agents naturals com els depredadors, carronyers, ocells o ratpenats (Texier, 2000).

Si bé els processos de formació culturals són els únics que són capaços de crear un jaciment arqueològic, tant aquests últims com els processos de formació naturals són capaços de preservar un jaciment. Els processos de formació culturals que permeten la preservació del registre poden anar des d'una pràctica funerària fins a la reordenació urbanística d'una ciutat o un barri (Schiffer, 1987; Butzer, 1989). Butzer (1989) considera als humans com un agent geomorfològic, a l'igual que els animals, que crea una gamma específica de sediments arqueològics. Rapp (1998) per la seva banda utilitza el terme "arqueosediment" per distingir els dipòsits que formen part del registre sedimentari i que són el resultat directe de les activitats humanes. Aquests sediments inclourien artefactes, carbons, cendres, estructures de combustió, etc. (Texier, 2000).

D'altra banda, des del moment que el lloc d'una activitat és abandonat pels seus protagonistes entren en joc una sèrie de factors naturals que permetran la preservació del registre. El ventall de processos naturals que permeten la preservació d'un jaciment és amplíssim, i van des de processos de sedimentació ràpids com una erupció volcànica (Mallol, 2004), fins a processos molt més lents com una sedimentació eòlica (Goldberg *et al.*, 2001) o una sedimentació en cova (Vallverdú, 2002; Goldberg i Sherwood, 2006). La presència dels processos naturals en un jaciment depèn molt del lloc i del medi en el que ens trobem, i d'ells dependrà, en gran mesura, el grau de preservació de les restes i la conservació de la disposició original.

Molts dels estudis en processos de formació s'han basat en diferenciar quan un jaciment es trobava *in situ* o en posició primària (és a dir, en la seva posició original) i quan un jaciment es trobava en una posició secundària (materials transportats i redipositats). Tant agents humans (Butzer, 1989) com agents naturals (Schiffer, 1987) poden causar una rediposició secundària del registre arqueològic que permeti d'alguna manera també la seva preservació. S'ha de tenir en compte però, que els artefactes que estan en posició primària poden no indicar la seva disposició antròpica original (Schiffer, 1987). Aquesta pot haver estat modificada de forma subtil per agents contemporanis a la seva deposició, que tant poden ser naturals com antròpics.

Molts cops els mateixos processos (antròpics o naturals) que permeten la preservació d'un jaciment també són els responsables de la modificació o alteració de les restes (Nash i Petraglia, 1987). Hi ha processos antròpics que impliquen el reciclatge o la reutilització d'artefactes descartats. També s'han d'incloure els processos de remobilització de sediments que alteren, o fins i tot poden arribar a invertir, les relacions estratigràfiques. Podríem dir que els processos antròpics que modifiquen o destrueixen el registre arqueològic són tan variats com les activitats humanes, fins al punt que es dona la paradoxa de que un dels processos que més modifica, o en desafortunades ocasions destrueix, el registre arqueològic és la pròpia excavació arqueològica. Tots hem sentit a parlar del símil entre una excavació arqueològica i la lectura d'un llibre al qual s'estripen les pàgines que s'han llegit.

Els processos naturals també són responsables de la transformació del registre arqueològic. Elements com la bioturbació o la diagènesi són molt comuns; la formació de sòls, la crioturbació o els efectes erosius de l'aigua també són força coneguts. De fet es podrien dividir els processos d'alteració i destrucció del registre arqueològic d'origen natural en dos grans grups; per una banda, els processos que depenen d'un factor biòtic, com per exemple la bioturbació. Per una altra els processos que depenen d'un factor abiòtic, com ara la crioturbació. Aquests processos no solament afecten als objectes arqueològics i a la seva distribució sinó que a més també poden afectar a la matriu sedimentària que els envolta (Karkanas *et al.*, 1999; Karkanas *et al.*, 2000; Karkanas *et al.*, 2002; Weiner *et al.*, 2002; Shahack-Gross *et al.*, 2004a). Però al mateix temps que els processos naturals transformen el registre arqueològic també hi deixen la seva marca, i molts cops aquests processos biòtics o abiòtics tenen uns condicionants climàtics o ambientals que permeten la seva posterior interpretació en termes paleoecològics (Courty i Vallverdú, 2001; Karkanas, 2001; Vallverdú *et al.*, 2001; Woodward i Goldberg, 2001).

### 3.1.3. Disciplines implicades en l'estudi dels processos de formació

En gran part l'estudi dels processos de formació d'un jaciment és una qüestió pluridisciplinar, on especialistes procedents de diferents camps comparteixen informació i intervenen en àmbits que no són pròpiament els seus. Un exemple d'això són els treballs que han realitzat diferents investigadors, geoarqueòlegs o biòlegs de formació, en àmbits com l'etnoarqueologia (Goldberg i Whitbread, 1993; Shahack-Gross *et al.*, 2003; Shahack-Gross *et al.*, 2004b) o la tafonomia dels vertebrats (Weiner i Bar-Yosef, 1990; Weiner *et al.*, 1993; Stiner *et al.*, 1995; Shahack-Gross *et al.*, 1997; Stiner *et al.*, 2000; Stiner *et al.*, 2001; Karkanas *et al.*, 2002; Weiner *et al.*, 2002; Berna *et al.*, 2004; Shahack-Gross *et al.*, 2004a). De fet, aquesta tesi també suposa aplicar una disciplina que inicialment està emmarcada dins de la paleobotànica en l'estudi dels processos de formació dels jaciments arqueològics.

Les disciplines que estudien els processos de formació disposen d'eines capaces per al coneixement del problema, i encara que es poden utilitzar de forma independent, les dades obtingudes per cadascuna d'aquestes disciplines s'han de confrontar amb les dades obtingudes per la resta (Texier, 2000).

34

Inicialment cal diferenciar l'escala sobre la qual es fa l'estudi. En l'obra editada per Goldberg, Nash i Petraglia: *Formation Processes in Archaeological Context* (Goldberg *et al.*, 1993), els diferents capítols estan separats depenent de l'escala d'estudi. Així doncs, ens trobem amb una escala d'estudi inter-jaciments, una escala intra-jaciment i una escala d'estudi microscòpica. L'escala d'observació inter-jaciments ens permet comparar jaciments o tipus de jaciments, d'aquesta forma, quan més tipus de jaciments comparem, més possibilitats tenim de veure repeticions en els processos de formació i poder identificar-los. L'escala intra-jaciment té a veure amb els problemes específics de cada jaciment, i en concret, a la forma en com un dipòsit dintre d'un jaciment pot tenir un origen diferent a un altre dipòsit del mateix jaciment. L'escala microscòpica estudia objectes de menys d'un mil·límetre i aporta tant informació sobre els processos naturals com dades sobre els processos antròpics. En aquesta tesi s'utilitzen les tres escales: l'escala inter-jaciment com a exemple de diferents tipus de jaciments per tal de definir els processos de formació a partir dels fitòlits; l'escala intra-jaciment per definir les diferències dels processos de formació en els dipòsits d'un mateix jaciment; i l'escala microscòpica ja que aquest és el rang d'observació dels fitòlits.

Tot i que com hem comentat anteriorment els processos de formació d'un jaciment es poden abordar des de diferents punts de vista metodològics, són quatre les principals disciplines que fins al moment han aprofundit més en aquests estudis: la geoarqueologia, la tafonomia dels vertebrats, l'etnoarqueologia i l'arqueologia experimental (Schiffer, 1983). En aquesta tesi en centrarem més en l'àmbit de la geoarqueologia, ja que les tècniques que s'han utilitzat per dur a terme aquesta investigació són més properes a aquesta disciplina.

### 3.1.3.1. L'etnoarqueologia, l'arqueologia experimental i la tafonomia

L'etnoarqueologia és l'estudi de la cultura material en un context sistèmic per tal d'adquirir informació que sigui utilitzable per la investigació arqueològica (Schiffer, 1995). Aquesta informació ha de ser recollida de forma meticulosa en el camp per un arqueòleg i no pas per un etnògraf, ja que d'aquesta manera s'aconsegueix una major resolució en el posicionament dels objectes que formen el registre (Yellen, 1977). Així doncs, no és d'estranyar que les investigacions de l'etnoarqueologia en el camp dels processos de formació se centrin sobretot en els artefactes continguts en els dipòsits i no en els dipòsits en si mateixos (David i Kramer, 2001). Interessa saber on es localitzen les activitats i quins són els productes d'aquestes activitats (Yellen, 1977), així com entendre els patrons que conformen cadascuna d'aquestes activitats depenent del grup que les realitza (Binford, 1980). Els estudis etnoarqueològics constaten també la diferència entre els objectes dipositats en el registre i els objectes recuperats, o en altres paraules, el biaix entre els artefactes utilitzats per una societat determinada i els artefactes del registre arqueològic que genera aquesta societat (Schiffer, 1983). Tot i això, en els darrers anys estan sortint a la llum treballs de caire etnoarqueològic que no tan sols estudien els artefactes sinó que també estudien els sediments des d'aquesta perspectiva. En aquest sentit són destacables els treballs de Brochier en les coves de pastors sicilianes (Brochier *et al.*, 1992) i els de Shahack-Gross amb els Maasai (Shahack-Gross *et al.*, 2003; Shahack-Gross *et al.*, 2004b).

S'ha de diferenciar, però, entre el que és etnoarqueologia pura i l'arqueologia experimental, encara que molts cops se solapen (Schiffer, 1995). L'arqueologia experimental no estudia situacions actuals en les que es poden observar comportaments, sinó que simula aquests comportaments per tal d'extraure'n informació. No es pot negar, però que també l'arqueologia experimental ha contribuït a estudiar els processos de formació, com ara per exemple els desplaçaments provocats pel gel en els objectes (Hilton, 2003) o fins i tot la composició i organització dels sediments en una granja experimental (Macphail *et al.*, 2004; Canti *et al.*, 2006; Macphail *et al.*, 2006).

La tafonomia estudia la forma com els materials orgànics deixen l'àmbit de la biosfera i passen al de la litosfera, és a dir, quines són les lleis de l'enterrament d'aquests materials (Efremov, 1940; Lyman, 1994), això inclou tant la tafonomia dels vertebrats com la tafonomia dels vegetals. La mateixa definició de tafonomia la implica directament en l'estudi dels processos de formació dels jaciments, tant aquells que provoquen les acumulacions com aquells que les alteren. En el cas concret de la tafonomia dels vertebrats s'estudien tant els processos pre-enterrament com els processos post-enterrament de les restes, i dintre d'aquests processos tant podem trobar les activitats humanes com els agents naturals (Lyman, 1994). La tafonomia dels vertebrats també utilitza el concepte de biaix en el registre arqueològic, en el que, fins i tot, en ocasions es consideren els processos tafonòmics en si mateixos els propis biaixos (Schiffer, 1983). Moltes de les discussions en la tafonomia dels vertebrats s'han centrat en descobrir quin és l'origen d'una determinada acumulació d'ossos, sobretot en els jaciments més antics (Binford i Ho, 1985; Binford *et al.*, 1988; Marean *et al.*, 1992; Arribas i Palmqvist, 1998; Domínguez-Rodrigo i Pickering, 2003). També la tafonomia dels vertebrats té un contingut important d'arqueologia experimental (Selvaggio, 1994; Blumenschine, 1995; Marean i Frey, 1997; Pickering i Egeland, 2006), a l'igual que moltes interconnexions amb l'etnoarqueologia.

Les investigacions en tafonomia de vegetals no són tan extenses com en el cas de la tafonomia dels vertebrats. Més que en el camp de l'arqueologia aquests treballs s'han desenvolupat sobretot en l'àrea de la paleoecologia (Martin-Closas i Gómez, 2004). Pel que fa a la tafonomia vegetal en jaciments arqueològics van der Veen (2007) documenta com es formen i s'alteren les acumulacions de llavors carbonitzades i plantes dessecades.

Minnis (1981) per la seva banda intenta identificar quins són els processos naturals i culturals que influeixen en la preservació del registre carpològic. La tafonomia del registre palinològic dels jaciments arqueològics s'ha centrat sobretot en l'estudi de les coves (Coles i Gilbertson, 1994; Goni, 1994; Navarro *et al.*, 2001) però també dels copròlits de diferents tipus d'animals (Fernández-Jalvo *et al.*, 1999; Carrion, 2002; Carrion *et al.*, 2005). L'antracologia centra els seus estudis en la tafonomia de la fusta, tant abans de ser cremada com després d'esdevenir carbó (Allué, 2002; Cohen-Ofri *et al.*, 2006). Pel que fa als fitòlits s'ha estudiat sobretot com es preserven aquests elements en els sòls actuals (Meunier *et al.*, 2001; Conley, 2002; Farmer, 2005; Farmer *et al.*, 2005), en canvi els estudis de la preservació de fitòlits en jaciments arqueològics o paleontològics no són tan comuns (Osterrieth *et al.*, en premsa; Piperno, 1985; Albert *et al.*, 2006; Lejju *et al.*, 2006).

### 3.1.3.2. La Geoarqueologia

36

Entre els anys 70 i 80 es va produir un canvi de perspectiva a l'hora d'estudiar els processos de formació. Si abans l'objecte d'estudi eren les restes arqueològiques i les seves associacions, ara l'objecte d'estudi passava a ser el dipòsit. Investigar els dipòsits no només dóna informació sobre com es van formar les acumulacions arqueològiques, sinó que a més, ens permet obtenir dades sobre l'edat, el paisatge i l'ambient en que s'han format aquests registres arqueològics (Rapp i Hill, 1998).

La necessitat de descriure aquests dipòsits provoca el naixement d'una nova branca dins l'arqueologia, la geoarqueologia, fruit de la col·laboració dels geocientífics amb els arqueòlegs (Stein, 2001). Amb tot, s'ha de tenir en compte que els arqueòlegs han treballat conjuntament amb geòlegs i paleontòlegs des de principis del segle XIX, fins al punt que l'arqueologia agafa de la geologia conceptes bàsics per a l'ordenació cronològica dels jaciments (Bar-Yosef, 2001). Però en aquest cas s'ha d'entendre que les geociències no només inclouen la geologia o la paleontologia, ja que, tant l'edafologia com la geografia formen part d'aquest conjunt (Butzer, 1989).

El terme geoarqueologia va ser encunyat per Renfrew al 1973 (Stein, 2001). Gladfelter (1977) utilitza el terme geoarqueologia en un sentit més paleoambiental, però Hassan (1979) amplia les competències de la geoarqueologia fins incloure els processos de formació com una de les qüestions a resoldre per aquesta branca de l'arqueologia. Amb anterioritat Butzer (Butzer, 1989) ja havia ampliat l'àmbit de la geoarqueologia, fins a incloure dins d'aquesta disciplina les datacions, els sondatges magnètics o bé els registres paleoambientals dels dipòsits sedimentaris.

La geoarqueologia no només se centra en els dipòsits que formen els jaciments arqueològics: la història geològica de diferents àrees, és a dir la variació del paisatge al llarg del temps, ens pot indicar quins jaciments es van preservar i quins van desaparèixer, i per tant modificar el concepte de la distribució dels jaciments arqueològics en una zona determinada (Waters i Kuehn, 1996).

En els últims anys els treballs en geoarqueologia s'han multiplicat i dispersat arreu del món, fins al punt que hi ha diversos manuals o revistes internacionals que porten el terme geoarqueologia en el seu títol.

Una de les branques de la geoarqueologia que ha participat més en l'estudi dels processos de formació és la micromorfologia dels sòls aplicada a l'arqueologia (Courty *et al.*, 1989). Aquesta disciplina ha permès, només com a exemple, interpretar els processos de formació de jaciments en cova o abríc en diferents cronologies (Goldberg, 2000; Courty i Vallverdú, 2001; Vallverdú *et al.*, 2001; Angelucci, 2003), a l'aire lliure (Shahack-Gross *et al.*, 2003; Mallol, 2004; Mallol, 2006) o en contextos urbans (Matthews *et al.*, 1997; Macphail *et al.*, 2003; Shahack-Gross *et al.*, 2005; Goldberg i Macphail, 2006), entre molts altres estudis.

La geoquímica i la mineralogia dels sediments es pot considerar també part de la geoarqueologia. Aquestes disciplines poden ajudar a resoldre qüestions sobre processos de formació; Schiffer (1983) considera que poden assistir sobretot a resoldre problemes sobre l'evidència negativa, ja que poden explicar quan les condicions van ser favorables per a la preservació o no dels materials arqueològics en els dipòsits sedimentaris.

En aquest sentit s'ha de destacar que en els darrers anys hi ha hagut un augment de les investigacions que tenen com a objectiu determinar els minerals amb l'anàlisi del FTIR. Aquests estudis permeten interpretar la diagènesi dels minerals o dels ossos, i conseqüentment, fer inferències sobre els processos tafonòmics i de formació d'un jaciment (Karkanas *et al.*, 1999; Karkanas *et al.*, 2000; Stiner *et al.*, 2001; Weiner *et al.*, 2002; Berna *et al.*, 2004; Shahack-Gross *et al.*, 2004a). Sovint aquests treballs van acompanyats de l'estudi dels fitòlits i de les anàlisis de micromorfologia (Albert *et al.*, 1999; Albert *et al.*, 2000; Goldberg *et al.*, 2001; Karkanas *et al.*, 2002; Albert *et al.*, 2003; Schiegl *et al.*, 2003; Shahack-Gross *et al.*, 2004b; Shahack-Gross *et al.*, 2005; Karkanas, 2006).

Les diferents branques de la geoarqueologia es complementen fàcilment entre elles, i també es poden complementar amb d'altres disciplines que no pertanyen a la geoarqueologia. Això permet abordar els processos de formació des d'una perspectiva més àmplia, fins i tot holística, que contribueix a una interpretació més fidedigna del passat.

## 3.2. Els fitòlits

### 3.2.1. Definició, formació i propietats dels fitòlits

El terme fitòlit prové del grec *fito* –planta i *litos* –pedra, de forma literal: pedres que produeixen les plantes. Els fitòlits són biomineralitzacions (Perry *et al.*, 2007) que es formen en algunes de les plantes superiors. Aquestes formacions minerals poden ser de silici o d'oxalat de calci, encara que normalment quan es parla de fitòlits ho fem referint-nos als fitòlits d'òpal, és a dir, silici hidratat ( $\text{SiH}_2\text{O}$ ). El silici és un dels elements més comuns en la superfície terrestre i les plantes l'absorbeixen en forma líquida (àcid monosilícic  $\text{Si}(\text{OH})_4$ ) a través de les arrels, juntament amb l'aigua i d'altres nutrients. Aquest silici es diposita en les parts aèries de la planta, sobretot en aquelles parts relacionades amb la fotosíntesi (Epstein, 1994; Alexandre *et al.*, 1997a), i ho fa a l'interior de les cèl·lules, a les parets cel·lulars o a l'espai intercel·lular adoptant la morfologia d'aquestes cèl·lules (Piperno, 1988; Piperno, 2006). La varietat morfològica de les cèl·lules vegetals és la que ens permet a posteriori identificar l'origen dels fitòlits. S'ha de tenir en compte, però, que hi ha algunes plantes que no dipositen silici entre les seves cèl·lules o n'acumulen ben poc, essent en la pràctica “invisibles” en el registre arqueològic. A més a més, no tots els vegetals acumulen la mateixa quantitat de silici, de tal forma que davant uns taxons “invisibles” podem trobar uns altres taxons sobrerrepresentats (Tsartsidou *et al.*, 2007).

Tot i que la producció de fitòlits està directament relacionada amb l'herència genètica de la planta (Piperno *et al.*, 2002; Zheng *et al.*, 2003), la quantitat d'aigua i de silici disponibles en el sòl poden fer variar la quantitat de fitòlits que produeix un vegetal, així com el seu grau de silificació i els tipus de fitòlits que es produeix (Rosen i Weiner, 1994). Com s'ha comentat abans les plantes adquireixen el silici del sòl de tal forma que tenen un paper important dintre del cicle del silici en la natura. Aquest paper és tan important que, fins i tot, abans de meteoritzar els minerals silícis per obtenir aquest component molts cops les plantes “reciclen” el silici dels fitòlits que prèviament s'han dipositat en el sòl (Meunier *et al.*, 2001; Conley, 2002; Farmer, 2005; Farmer *et al.*, 2005).

La funció del silici, i en concret dels fitòlits, en les plantes superiors no queda massa clara, hi ha qui pensa que funcionen com a elements estructurals per al creixement del vegetal, mentre que d'altres suposen que és un sistema defensiu de cara als herbívors i paràsits (Lucas *et al.*, 2000; Massey *et al.*, 2006), fins i tot s'ha arribat a proposar que els fitòlits són el resultat de l'excreció per part de les plantes d'una substància com el silici, que en excés pot arribar a resultar tòxica (Piperno i Pearsall, 1993a).

Els fitòlits es dipositen en els sòls o en els sediments quan la planta es mor i es descompon o bé és incinerada. En condicions extremes, com ara sota l'efecte dels vents provinents del desert del Sàhara que arriben a les costes de les Illes Canàries, els fitòlits es poden desplaçar



centenars de quilòmetres (Piperno, 1988) però generalment es considera que la seva deposició és *in situ* i que el seu desplaçament horitzontal o en vertical entre els estrats és imperceptible (Grave i Kealhofer, 1999). La natura inorgànica dels fitòlits els fa resistents a processos que la matèria orgànica vegetal no carbonitzada és incapaç de superar. Així doncs, són resistents al foc, almenys no canvien la seva morfologia fins a temperatures de 700°C tot i que el punt de fusió del silici se situa sobre 900-1000°C. També són resistents a pH àcids, però en canvi es poden dissoldre quan el pH del sòl és elevat (Jones i Beavers, 1963; Piperno, 1988; Piperno, 2006).

### 3.2.2. Història de les investigacions en fitòlits

La història de la investigació dels fitòlits comença a principis del segle XIX, quan al 1835 l'alemany Struver els va identificar per primer cop en les plantes vives (Piperno, 1988). Amb tot, abans ja s'havien descrit els fitòlits com a constituents del sòl o dels sediments transportats pel vent. Un exemple d'això ho tenim en el mateix Darwin, que durant el seu viatge a bord del Beagle, cap al 1845, va detectar a uns quants quilòmetres de la costa nord-africana aquestes partícules (Powers, 1992). El primer sistema de classificació pertany, però, a Eherenberg, científic alemany, que els va anomenar "Phytolitharia" (pedres de planta en grec) (Piperno, 1988). Aquest mateix científic va treballar amb les mostres recollides per Darwin, i és considerat com el pare dels estudis de fitòlits (Powers, 1992). Més endavant els interessos dels científics que estudien els fitòlits es mouran cap a la botànica per investigar el seu origen. Cap a finals del segle XIX i almenys fins al període de la Segona Guerra Mundial, les investigacions se centren en Europa, i especialment en Alemanya. És durant aquest període, un cop ja s'ha reconegut la procedència vegetal d'aquests elements, quan comencen les primeres exploracions sistemàtiques de la producció de fitòlits, taxonomia i variació intraespecífica. També es van dur a terme estudis quantitius de silici en plantes modernes i es proposen els primers sistemes de deposició.

El període de la Segona Guerra Mundial produeix un hiatus que pràcticament interromp les investigacions en aquest camp, encara que destaquen alguns treballs en els talls dels sòls russos (Powers, 1992). Als voltants de 1950 es renova l'interès pels fitòlits, aquest cop per part de científics anglosaxons, on destaca el paper de Smithson (Powers, 1992). Sobretot es tracta, però, de botànics, científics del sòl, agrònoms i geòlegs que apliquen les investigacions de fitòlits a la història ambiental i al paleoclima. Al mateix temps es continuen els processos de descripció dels fitòlits en plantes actuals i la seva classificació. Destaca en aquest moment el treball de Twiss en les gramínies (Twiss *et al.*, 1969; Piperno, 1988). En els últims anys s'han dut a terme dos tipus d'estudis sobre fitòlits: la sistemàtica dels fitòlits de les plantes modernes i la interpretació dels fitòlits que es recuperen de contextos sedimentaris, incloent-hi els contextos arqueològics (Mulholland i George Rapp, 1992).

La utilització dels fitòlits en l'arqueologia arranxa ja de principis del segle XX quan Netolizky corregeix alguns errors d'interpretació de restes carpològiques d'alguns jaciments suïssos i de la resta d'Europa a través de l'anàlisi del residu inorgànic de les cendres, la qual cosa inclou també els fitòlits. Durant aquesta època també es realitzen treballs en Turquia, on s'identifiquen per part de Schellenberg, restes de fitòlits en ceràmiques d'assentaments prehistòrics. El gruix del treball, no obstant, se centra en l'origen de l'agricultura al Pròxim Orient durant els anys seixanta, on destaquen els treballs de Helback en jaciments neolítics. Segons Piperno (1988), però, la primera aproximació sistemàtica als fitòlits des de l'arqueologia apareix en els jaciments de la zona Atlàntica de l'Amèrica del Nord i els tròpics, on la conservació vegetal és molt pobra, encara que ella marca com una fita important l'article de Rovner (1971), a partir del qual pensa que creix l'interès dels prehistoriadors per aquesta disciplina.

En els darrers anys les investigacions sobre fitòlits s'han diversificat fins a incloure períodes que van des del Cretàcic (Prasad *et al.*, 2005) fins a l'actualitat i abraçant a la pràctica els cinc continents i, fins i tot, alguns oceans (Flores *et al.*, 2000; Abrantes, 2003; Abrantes *et al.*, 2007).

### 3.2.3. Aplicacions dels fitòlits

40

#### 3.2.3.1. Paleoecologia i vegetació

El potencial paleoecològic dels fitòlits és evident, en tant i en quant ens permet la reconstrucció de la vegetació del passat (Rovner, 1971; Fredlund i Tieszen, 1997a; Blinnikov *et al.*, 2002; Stromberg, 2002; Stromberg, 2004). Aquesta reconstrucció passa per identificar les plantes que produeixen un determinat tipus de fitòlit. D'aquesta manera molts dels treballs que s'han dut a terme en aquest camp estan orientats a l'obtenció d'una col·lecció de referència d'un determinat conjunt de plantes amb un significat ecològic, o bé a la determinació d'una espècie de planta a partir de la definició dels fitòlits que la caracteritzen (Ollendorf *et al.*, 1987; Mulholland *et al.*, 1988; Bozarth, 1992; Cummings, 1992; Kaplan *et al.*, 1992; Ollendorf, 1992; Zhao *et al.*, 1998; Albert, 2000; Krishnan *et al.*, 2000; Wallis, 2003; Carnelli *et al.*, 2004; Gallego i Distel, 2004; Tsartsidou *et al.*, 2007). Es dona el cas, però, que no tots els fitòlits identificats en les plantes es poden recuperar dels sediments estudiats, per això sovint s'utilitza com a referència els fitòlits que es troben als sòls, o la combinació d'una col·lecció de referència de la vegetació actual i l'estudi dels fitòlits del sòl on creixen aquestes plantes (Fredlund i Tieszen, 1994; Fredlund i Tieszen, 1997a; Runge, 1999; Bobrov, 2003; Blinnikov, 2005; Albert *et al.*, 2006).

En un primer moment, la majoria de les investigacions paleoecològiques que es feien a partir dels fitòlits es van centrar en els tròpics, sobretot els americans, degut a que les condicions de preservació en aquest tipus de medi afavoreixen la conservació dels fitòlits (de natura inorgànica) per davant d'altres restes paleobotàniques formades per material orgànic (Piperno, 1989; Piperno, 1991; Bush *et al.*, 1992; Bush i Colinvaux, 1994). En l'actualitat, però, els estudis paleobotànics basats en les investigacions sobre fitòlits s'han estès per tot el món i comprenen la majoria de les cronologies, prova d'això és l'extensa bibliografia que existeix sobre el tema. (Fisher

*et al.*, 1995; Alexandre *et al.*, 1997b; Fredlund i Tieszen, 1997a; Fredlund i Tieszen, 1997b; Carter i Lian, 2000; Blinnikov *et al.*, 2002; Prebble i Shulmeister, 2002; Stromberg, 2002; Bremond *et al.*, 2004; Stromberg, 2004; Thorn, 2004a; Bamford, 2005; Zucol *et al.*, 2005; Albert *et al.*, 2006; Bamford *et al.*, 2006; Stromberg *et al.*, 2007). Molts d'aquests estudis es basen sobretot en el tipus de fotosíntesi (C3 vs C4) que realitzen les plantes (Barboni *et al.*, 1999; Thorn, 2004a) i en la diferenciació d'aquest procés a partir de les cèl·lules curtes d'aquestes plantes, majoritàriament poàcies (Twiss *et al.*, 1969; Twiss, 1987; Twiss, 1992). En els darrers anys aquestes investigacions s'han complementat amb estudis, per exemple, de l'estrès hídric que poden sofrir les plantes i com s'expressa això en les proporcions de certes morfologies dels fitòlits (Bremond *et al.*, 2005). Els fitòlits, però, no només ens aporten informació paleoecològica a partir de la seva identificació i l'assignació a la planta o família que els ha format. Cada cop més es publiquen investigacions que aporten dades paleoclimàtiques a partir de la determinació dels isòtops dels mateixos fitòlits (Kelly *et al.*, 1991; Shahack-Gross *et al.*, 1996; Fredlund i Tieszen, 1997b; Kelly *et al.*, 1998; Lu *et al.*, 2000; Webb i Longstaffe, 2002; Webb i Longstaffe, 2003; Webb i Longstaffe, 2006).

### 3.2.3.2. Arqueologia

Degut a les seves característiques els fitòlits s'han aplicat en diferents camps de l'arqueologia. En els jaciments prehistòrics, o paleolítics, els fitòlits permeten conèixer millor el funcionament de les estructures de combustió (Albert *et al.*, 2000), o la forma en la que els grups caçadors recol·lectors gestionaven els recursos vegetals (Boyd, 2002; Madella *et al.*, 2002).

L'aparició de les primeres societats productores i de l'agricultura ha estat un objecte d'estudi clau per a l'aplicació dels fitòlits a l'arqueologia. Moltes de les fites en les investigacions dels fitòlits s'han aconseguit a través de l'estudi d'aquests microfòssils en jaciments neolítics antics en el continent americà, on destaquen principalment els treballs en les zones tropicals (Piperno, 1998; Piperno *et al.*, 2000; Piperno i Stothert, 2003) i en l'aparició del blat de moro (Piperno i Pearsall, 1993b; Pearsall, 2002; Iriarte, 2003; Pearsall *et al.*, 2003; Pearsall *et al.*, 2004a; Pearsall *et al.*, 2004b; Boyd *et al.*, 2006; Holst *et al.*, 2007; Pohl *et al.*, 2007), encara que en aquest últim cas no falta la polèmica (Pearsall *et al.*, 2004a; Rovner, 2004). També en el continent asiàtic l'aparició dels primers cultígens d'arròs ha centrat molta de la feina desenvolupada fins al moment; destaquen els casos de la Xina (Jiang, 1995; Itzstein-Davey *et al.*, 2007; Li *et al.*, 2007), Tailàndia (Kealhofer i Piperno, 1994) i l'Índia (Saxena *et al.*, 2006). Com a fet curiós dintre d'aquest context asiàtic s'han pogut arribar a identificar alguns dels primers plats de pasta coneguts a partir dels fitòlits (Lu *et al.*, 2005). El Pròxim Orient, focus reconegut dels processos de neolitització i de la formació de societats complexes, ha estat també un camp abonat per a l'estudi dels fitòlits en els jaciments neolítics i posteriors (Portillo *et al.*, en premsa; Rosen, 1989; Rosen, 1993; Rosen i Weiner, 1994; Rosen, 1997; Albert i Henry, 2004).

L'anàlisi dels fitòlits sobre restes ceràmiques o estructures d'emmagatzematge permet conèixer el contingut d'aquestes (Jones, 1993; Pearsall *et al.*, 2003; Bozarth i Guderjan, 2004). De la mateixa manera, tant de forma directa com de forma indirecta a través de les traces d'ús, l'aplicació dels estudis de fitòlits sobre diferents tipus d'eines, com ara molins o indústria lítica, permet fer inferències sobre la utilització de dites eines (Derrico *et al.*, 1995; Sobolik, 1996; Kealhofer *et al.*, 1999; Domínguez-Rodrigo *et al.*, 2001; Hardy, 2004; Pearsall *et al.*, 2004b; Portillo, 2006; Debert i Sherriff, 2007). Els fitòlits, en major o menor mesura poden deixar les

seves traces en la superfície de les dents (Gugel *et al.*, 2001; Sanson *et al.*, 2007) i això es pot aprofitar per estudiar la dieta dels animals i dels humans durant el passat, i fins i tot es poden arribar a recuperar fitòlits del càlcul dental encara que en aquest camp queda molt treball per desenvolupar (Fox *et al.*, 1994; Middleton i Rovner, 1994; Lalueza *et al.*, 1996; Mainland, 2003; Pearsall *et al.*, 2003; Merceron *et al.*, 2005; Okumura i Eggers, 2005; Palombo *et al.*, 2005; Boyadjian *et al.*, 2007).

Un dels avanços més importants en els darrers anys és la utilització de les anàlisis morfomètriques per determinar amb una major precisió la procedència dels fitòlits identificats en contextos arqueològics (Albert *et al.*, en premsa; Portillo *et al.*, en premsa; Ball i Brotherson, 1992; Ball *et al.*, 1993; Ball *et al.*, 1996; Whang *et al.*, 1998; Ball *et al.*, 1999; Parr *et al.*, 2001; Berlin *et al.*, 2003; Ball *et al.*, 2006; Portillo *et al.*, 2006; Albert *et al.*, 2008).

També s'han de destacar treballs experimentals duts a terme sobre els fitòlits i que tenen molt sovint aplicacions directes sobre els jaciments arqueològics. Aquests treballs poden anar des de l'estudi del processament dels vegetals (Harvey i Fuller, 2005) fins a la detecció de fitòlits que han estat alterats tèrmicament i que poden formar part dels residus de combustió (Elbaum *et al.*, 2003; Parr, 2006). S'ha de comentar que les investigacions etnoarqueològiques amb anàlisi de fitòlits també s'estan obrint pas en els últims temps (Zurro *et al.*, en premsa; Shahack-Gross *et al.*, 2003; Shahack-Gross *et al.*, 2004b; Tsartsidou *et al.*, 2008).

Cal fer una menció especial a les analítiques de fitòlits combinades amb d'altres tècniques, com la micromorfologia dels sòls o la mineralogia que han permès fer avanços substancials en la ciència arqueològica i, si més no, realitzar aquesta tesi doctoral. L'aplicació de l'anàlisi de fitòlits conjuntament amb les disciplines més pròpies de les ciències de la terra neix de la necessitat d'entendre els processos tafonòmics i diagenètics en jaciments, principalment paleolítics, del Mediterrani Oriental. D'aquesta forma, durant la segona meitat de la dècada dels noranta del segle passat sorgeixen les primeres investigacions que combinen l'anàlisi dels fitòlits i l'aplicació del FTIR en jaciments arqueològics (Schiegl *et al.*, 1996; Albert *et al.*, 1999). Aquestes investigacions s'emmarquen dintre de tot un procés que intenta identificar la diagènesi mineral en les coves i en concret dels biominerals com els ossos (Weiner i Bar-Yosef, 1990; Weiner *et al.*, 1993; Stiner *et al.*, 1995; Weiner *et al.*, 1995; Shahack-Gross *et al.*, 1997; Karkanas *et al.*, 1999). A principis d'aquest segle les investigacions en ambdós sentits es multipliquen i comencen a participar més activament altres disciplines com la micromorfologia del sòls aplicada a l'arqueologia (Albert *et al.*, 2000; Karkanas *et al.*, 2000; Stiner *et al.*, 2000; Stiner *et al.*, 2001; Karkanas, 2002; Weiner *et al.*, 2002; Albert *et al.*, 2003; Shahack-Gross *et al.*, 2003), però ara, a més a més s'obren noves línies d'investigació fora dels jaciments del Mediterrani Oriental (Goldberg *et al.*, 2001; Karkanas *et al.*, 2002; Shahack-Gross *et al.*, 2003).

Una de les innovacions més importants en aquest sentit és poder realitzar un càlcul de la quantitat de fitòlits en els sediments; això ens permet comparar no tan sols mostres dintre del mateix jaciment, encara que els sediments tinguin un estat de preservació desigual o hagin sofert processos tafonòmics en diferent mesura, sinó que a més permet comparar mostres entre jaciments (Albert i Weiner, 2001). En els darrers anys han continuat les investigacions en els jaciments paleolítics, però aquests s'han estès pel Mediterrani Occidental, l'Europa continental i Àfrica (Berna *et al.*, 2004; Karkanas *et al.*, 2004; Schiegl *et al.*, 2004; Shahack-Gross *et al.*, 2004a; Albert *et al.*, 2006; Bamford *et al.*, 2006; Cabanes *et al.*, 2007; Karkanas *et al.*, 2007). A més a més, no tan sols s'estudien jaciments paleolítics sinó que s'està aplicant aquesta complementarietat

de les ciències de la terra amb els fitòlits a jaciments de cronologies més recents (Cabanes *et al.*, en premsa; Shahack-Gross *et al.*, 2004b; Shahack-Gross *et al.*, 2005; Berna *et al.*, 2007; Albert *et al.*, 2008).

### 3.2.3.3. Datacions

En algunes ocasions la matèria orgànica procedent de la planta original queda envoltada quan els fitòlits es formen. Aquesta matèria orgànica es pot observar en forma d'àrees negres a l'interior dels fitòlits, les quals han estat reconegudes com a carbó, o almenys, com a matèria amb un alt contingut de carboni (Mulholland i Prior, 1993). Si es concentra aquesta matèria orgànica es pot arribar a obtenir suficient carbó per a poder realitzar datacions amb carboni 14 per AMS (Mulholland i Prior, 1993).

De la mateixa manera s'ha demostrat que si els fitòlits han sofert temperatures de com a mínim 350°C poden ser utilitzats per realitzar datacions per termoluminescència (Rowlett i Pearsall, 1993).

### 3.2.3.4. Altres aplicacions

Aquesta matèria orgànica que queda atrapada dintre de la matriu de silici pot arribar a contenir les restes d'ADN de la planta que ha format el fitòlit, tenint l'avantatge que les cadenes d'ADN no haurien sofert atacs bacterians ja que es troben aïllades i protegides pel silici que forma el fitòlit (Elbaum *et al.*, en premsa). Reproduir i amplificar les cadenes d'ADN contingudes en els fitòlits ens donaria una informació clau per resoldre qüestions referents a l'evolució i la domesticació de les plantes. Fins al moment, però, no s'ha aconseguit extreure ADN en suficient quantitat per poder ser amplificat pel procediment del PCR (Elbaum *et al.*, en premsa).

Una altra aplicació, curiosa si més no, dels fitòlits és determinar la qualitat de la pasta alimentària. El tipus de blat ideal per a fabricar pasta és el *Triticum durum*, mentre que el que s'utilitza normalment per fer el pa és el *Triticum aestivum*. Les diferències morfomètriques entre els fitòlits de la inflorescència d'aquests dos tipus de blat permet saber si la pasta que ens estem menjant ha estat fabricada amb la farina adient, o bé aquesta pasta conté farina adulterada amb farina que s'hauria d'haver utilitzat per fer el pa (Hodson *et al.*, 2001).

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI

L'ESTUDI DELS PROCESSOS DE FORMACIÓ DELS SEDIMENTS ARQUEOLÒGICS

I DELS PALEOSÒLS A PARTIR DE L'ANÀLISI DELS FITÒLITS , ELS MINERALS I ALTRES MICRORESTES

Dan Cabanes i Cruelles

ISBN:978-84-692-1535-7/DL-T-378-2009

## **4. La Gorja d'Olduvai**

**45**

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI

L'ESTUDI DELS PROCESSOS DE FORMACIÓ DELS SEDIMENTS ARQUEOLÒGICS

I DELS PALEOSÒLS A PARTIR DE L'ANÀLISI DELS FITÒLITS , ELS MINERALS I ALTRES MICRORESTES

Dan Cabanes i Cruelles

ISBN:978-84-692-1535-7/DL-T-378-2009



**4.1. Taphonomy of phytoliths and macroplants  
in different soils from Olduvai Gorge (Tanzania)  
and the application to Plio-Pleistocene  
palaeoanthropological samples**

47

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI

L'ESTUDI DELS PROCESSOS DE FORMACIÓ DELS SEDIMENTS ARQUEOLÒGICS

I DELS PALEOSÒLS A PARTIR DE L'ANÀLISI DELS FITÒLITS , ELS MINERALS I ALTRES MICRORESTES

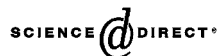
Dan Cabanes i Cruelles

ISBN:978-84-692-1535-7/DL-T-378-2009



ELSEVIER

Available online at [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)



Quaternary International 148 (2006) 78–94



## Taphonomy of phytoliths and macroplants in different soils from Olduvai Gorge (Tanzania) and the application to Plio-Pleistocene palaeoanthropological samples

Rosa Maria Albert<sup>a,\*</sup>, Marion K Bamford<sup>b</sup>, Dan Cabanes<sup>c</sup>

<sup>a</sup>Catalan Institution for Research and Advanced Studies (ICREA)/Research Group for Paleocological and Geological Studies, Department of Prehistory, Ancient History and Archaeology, University of Barcelona, c/Baldiri Reixac, s/n, 08028 Barcelona, Spain

<sup>b</sup>Bernard Price Institute for Palaeontological Research, School of Geosciences, University of the Witwatersrand, P Bag 3, WITS 2050, South Africa

<sup>c</sup>Àrea de Prehistòria, Department of Geography, History and History of Art, University Rovira i Virgili, Pl. Imperial Tàrraco, 1, 43005 Tarragona, Spain

Available online 24 January 2006

### Abstract

The abundance and types of phytoliths in the fossil record are taphonomically biased and do not correspond with the macroplant record. To better understand the bias and improve the interpretation of samples from Olduvai Gorge, Tanzania, we analysed the phytoliths from three sample sets: modern grasses, sedges, palm and dicots in the area; modern soils in the area; and the fossil soils from the eastern palaeolake margin in lowermost bed II. Fourier transform infrared spectrometry analyses were performed in parallel to compare the mineral composition of both modern soils and fossil soils. We found that the abundance of phytoliths is greatly reduced in soil samples compared with modern plant material, but the morphotypes can be reliably interpreted. Dicotyledonous wood/bark phytoliths appear to be over represented in the soil types. Grass phytoliths, and sedges to a lesser degree, are preserved in the soils but in lower abundances resulting in these groups being under-represented. The macroplant fossils are fragments of grass and sedge aerial culms, and dicotyledonous stems that are preserved in fluvial and lacustrine deposits. It is suggested that phytoliths represent the continuous flora whereas macroplant fossils represent the more robust tissues of selected plants preserved under more catastrophic conditions. A post-depositional model is proposed and the palaeovegetation is reinterpreted as being richer and more complex than indicated by other fossil data.

© 2005 Elsevier Ltd and INQUA. All rights reserved.

### 1. Introduction

A variety of methods have been employed to interpret the palaeoenvironments of early hominin sites since it is generally accepted that the vegetation and climate affect the distribution and behaviour of the hominins and other faunas. The sedimentological record provides broad palaeoecological signatures such as fluvial, lacustrine, volcanic or dune settings. Isotope analyses of carbonates can provide a temperature and moisture regime. Faunal composition and comparison with modern faunas is another common method employed. A refinement of this method is that of functional ecomorphology where

physical adaptations of modern animal limbs to certain conditions (running, climbing, burrowing) are extrapolated to the fossils. These methods can provide an indication of the general type of vegetation: open woodland, closed woodland, bushy grassland, etc, but the fossil plants themselves should be considered when a more detailed reconstruction of the vegetation is required.

At Olduvai Gorge in northern Tanzania, there already is a good geographic and stratigraphic framework for the occupation by hominins of the basin and palaeolake margins (Hay, 1976, 1996) and this is being further refined by the multidisciplinary efforts of the Olduvai Landscape and Palaeoanthropological Project (OLAPP) team members.

Palynological samples from uppermost bed I (UMBI) and lowermost bed II (LMBII) separated by the marker tuff, IF (dated at ca. 1.785 myr, Blumenschine et al., 2003), have been processed by Bonnefille (1984). She interpreted

\*Corresponding author. Tel.: +34 93 3333466x3198;

fax: +34 93 4498510.

E-mail address: [rosamaria.albert@icrea.es](mailto:rosamaria.albert@icrea.es) (R.M. Albert).

the vegetation as changing from wetter conditions (montane pollen such as *Olea*) to drier conditions just below tuff IF, with an increase in Sudano-Zambezian taxa. Not all the other strata, however, contain pollen. Silicified wood has been identified from one locality and, based on comparisons with the distribution of the modern analogue, it indicates a medium-sized shade tree growing on well drained soils (*Guibourtia coleosperma*; HWK-East locality, probably LMBII; Bamford, 2005). Silicified wood, however, is not common and fossil leaves have not been recovered to date.

Fossil macroplants and phytoliths (Hay, 1976; Peters and Blumenshine, 1995) have been widely recognised in the fossil record and were interpreted as representing a general marshland type of vegetation along the eastern palaeolake margin, an area of 10–20 km long by 1–10 km wide. On closer inspection, however, the macroplants have a more precise distribution within this large area and time.

Phytoliths have been widely used for palaeoecological reconstruction (Bamford et al., this volume, and references therein). When applied to archaeological contexts, phytoliths have been used to identify plants used by prehistoric populations as well as to distinguish between those used by people, and those that are natural accumulations and that indicate the past vegetation (Rosen and Weiner, 1994; Runge, 1999; Albert et al., 1999, 2000, 2003; Mercader et al., 2000; Madella et al., 2002; Berlin et al., 2003; Pearsall et al., 2004; Albert and Henry, 2005). To date, there have been different approaches to reconstruct the palaeoenvironment. Some have focused on the comparison between phytoliths and fossil plants, for example Zucol et al. (2005), or have compared phytoliths from modern plants and modern soils (Blinnikov, 2005). The comparison of modern and fossil soils has also been done (Fredlund and Tieszen, 1997). For the first time, however, we attempt to correlate phytoliths from modern plants and modern soils, following a quantitative and morphological approach, and apply these data to the early hominin-bearing sediments at Olduvai Gorge, within a well-constrained stratigraphical framework.

The macroplants (fragments of stems and culms) and phytoliths have been used to reconstruct the vegetation and how it has changed during the relatively short period of time represented by LMBII and confined to the eastern palaeolake margin (Bamford et al., this volume). The interpretation of the results showed that the vegetation during this time was composed of a variety of grasses, sedges and dicotyledonous plants in different proportions and in different areas and in one specific place showed the presence of palm trees (Bamford et al., this volume). The caveats are that there are taphonomic biases in the preservation of certain phytolith morphologies and the abundance of phytoliths varied between sites and between similar facies for no apparent ecological reason. Furthermore, the vegetation signature from the macroplants and from the phytoliths did not always correlate. With the very narrow time stratigraphic and spatial constraints at play

within the Olduvai Basin localities we would expect the macro and micro fossil plant data to be comparable. Since this is not always the case, we attempt here to determine the taphonomic biases and then correlate the plant data. Then the phytoliths and macroplants can be used for other areas within Olduvai, and other time frames.

Several modern soil types have been sampled to reflect as closely as possible those in the fossil record, Fourier transform infrared spectrometry (FTIR) analyses were done as well as noting the plants growing in the modern soil samples. By comparing the phytoliths from the living plants with those found in the modern soils we are able to get an indication of which plants and plant parts are represented in the soils, whether or not they relate to the extant vegetation, and finally some of the ways in which the types of soil affect the preservation and diversity of the phytoliths, macroplants and pollen. Using this database, we can better interpret the fossil soil phytoliths for palaeoenvironmental reconstructions.

Several basic assumptions are made: firstly, that most plants produce a variety of phytoliths, some of which are diagnostic for that species/genus/group. This we have shown (Bamford et al., this volume) and others before us (Piperno, 1988; Rosen and Weiner, 1994; Runge, 1999; Albert and Weiner, 2001 and references therein). Secondly, the abundance of phytoliths produced by various plants and plant parts is an important factor and diagnostic for the taxon (Albert et al., 1999, 2000, 2003). Thirdly, the phytoliths from the dead plants are deposited in the soil where the plant grew. Transportation of plant litter is minimal but can be recognised by fluvial or eolian signatures. Dune formation is minimal in the Olduvai sediments and these deposits were not sampled. Thus, we can analyse a variety of soils from various types of vegetation and the phytoliths should reflect the local vegetation. The longevity and durability of the phytoliths is unknown but we assume that it will depend upon the mineralogical conditions of soils and diagenetic processes suffered after their deposition in the soil. The frequent pyroclastic fallout effectively capped and sealed the successive layers of clays through beds I and II.

We present here the comparison of the results of modern plants, modern soils and fossil samples, both from phytoliths and silicified plant fragments, from LMBII, to obtain more reliable information on the changing vegetation of the area after the catastrophic event of the deposition tuff IF and its relation to the recolonisation of the area by hominins.

## 2. Materials and methods

### 2.1. Sample selection

Although phytoliths are produced by the aerial parts of plants, they are preserved in soils after the decay and disappearance of the organic matter. Since the mineralogical composition of the soils, as well as the pH, fluctuating

ground water, reworking and chemical and physical post-depositional processes appear to affect the preservation of phytoliths, different soils have been sampled. Selection of modern soil samples (from different localities) has been correlated with fossil soil types present at Olduvai Gorge, namely earthy clays, waxy clays, tuffs, surge, reworked tuff, lacustrine and fluvially associated clays (Hay, 1976; Peters and Blumenschine, 1995; Blumenschine and Peters, 1998). From analogous regions close by we have collected soils from lake margins, river bed and banks, the edge of the Serengeti plains, and with different vegetation types such as open grassland, open woodland and riverine woodland. The phytoliths have been extracted from these samples and compared to the modern plant reference collection analysed from the same area, thus enabling identification of the soil phytoliths. From these results a model to explain the taphonomy of phytolith preservation in a silica-rich environment, such as the one present at Olduvai Gorge (Hay, 1976) is proposed and compared with macroplant and pollen preservation.

Olduvai Gorge sampling, thus far, has concentrated on the UMBI, tuff IF and LMBII levels in the eastern palaeolake margin localities of HWK-East, MCK, FLK-North and VEK (locality notation of Leakey, 1967). From each of these sites, soil samples have been taken at various levels for phytolith analyses. The sediments have been excavated within 1–2 m wide archaeological-geological trenches, and sieved to recover all the contained stone artefacts, bone and silicified plants.

### 2.2. Preparation of modern soil samples for phytoliths

The phytolith extraction method followed was described in detail by Albert et al. (1999) for the Tabun cave study. A weighed aliquot of about 1 g of air-dried sediment was treated with 10 ml of an equivolume solution of 3 N HCl and 3 N HNO<sub>3</sub> for 30 min and then centrifuged to eliminate the carbonates and phosphates present in the soils. After washing the pellet with water the organic material was oxidised with 30% hydrogen peroxide at 70 °C. The sample was dried and the remaining sediment was weighed. This is referred to as the inorganic acid insoluble fraction (AIF).

Mineral components of the AIF were separated according to their densities in order to concentrate the phytoliths by adding 5 ml of sodium polytungstate solution [Na<sub>6</sub>(H<sub>2</sub>W<sub>12</sub>O<sub>40</sub>)·H<sub>2</sub>O] of 2.4 g/ml density. The suspension was centrifuged and the supernatant was transferred to another centrifuge tube, 1.0 ml of deionised water was added and the tube was vortexed and again centrifuged as above. This cycle was repeated until no visible mineral particles remained in the supernatant. The heavy liquid was then diluted by filling the centrifuge tube with deionised water, to ensure that even the lightest minerals are recovered. After each centrifuge step, the sediment deposited at the bottom of the tube (pellet) was transferred to a 1.5 ml microcentrifuge tube. Note that this method has the advantages of creating separation conditions that

concentrate the relatively light opaline phytoliths, which have a density between 1.5 and 2.3 g/ml (Jones and Beavers, 1963), in the last two cycles.

Slides of the pellets were prepared for the three lightest fractions by weighing approximately 1 mg of sample, with an accuracy of 0.1 mg, onto a microscope slide. The samples were mixed with Entellan New (Merck), and a cover slip was placed over the suspension. The aerial coverage of the sample on the slide was estimated by counting the total number of fields containing sample grains. Slides were studied using an Olympus BX41 optical microscope and digital images were taken and stored with a digital camera Olympus Camedia C-5060 and Olympus DP soft 5.0 software.

Since phytoliths are produced by many living plants, and many phytolith morphologies are common to a variety of different plants, only some morphologies, or suites of morphologies, are useful for the identification of particular plants. According to previous results (Albert and Weiner, 2001), the counting of only 50 phytoliths with diagnostic morphologies gives an error margin of 40% and is considered too unreliable for interpretation, whereas the counting of 200 diagnostic phytoliths gives an error margin of around 20%. Thus, whenever possible, a minimum number of 200 diagnostic morphologies were counted in order to obtain the maximum reliability in the identification and interpretation of the phytolith record. Siliceous fragments were not counted.

### 2.3. Description and identification of phytoliths

To estimate the phytolith abundance in the different samples we followed standard methods described in Albert (2000); Albert et al. (1999) and Albert and Weiner (2001). The morphological identification of phytoliths was based on the results obtained from the study of the modern plant reference collection carried out in the same area and, when possible, on the same plants growing where the soil samples were collected (Bamford et al., this volume). Comparison of morphologies with other modern plant reference collections was also performed (Twiss et al., 1969; Brown, 1984; Ollendorf et al., 1987; Piperno, 1988; Bozarth, 1992; Mulholland and Rapp, 1992; Ollendorf, 1992; Runge, 1999; Mercader et al., 2000). The terms used to describe the phytoliths followed the anatomical terminology of the cell in which they were formed and, when this was not possible, we followed geometrical definitions (Albert, 2000; Albert and Weiner, 2001). The new phytolith code of terminology has also been checked to homogenise some of the terminologies used (Madella et al., 2005).

### 2.4. FTIR analysis of soils

Infrared spectra of modern soils were obtained using KBr pellets (about 0.1 mg or less of sample in about 50 mg of KBr) and a Fourier transform infrared spectrometer (FTIR) (Jasco 680 plus with Spectra Manager software).

Samples were dried under a hot lamp for 12 h. About 1 mg of initial sample, previous to acid treatment, was added to KBr to make pellets. The spectrometer was calibrated twice and blank samples of known composition were checked. The spectra were collected at  $4\text{ cm}^{-1}$  resolution. The FTIR analysis provides information on the nature of the siliceous minerals that constitute the bulk of the sample, namely quartz, volcanic siliceous minerals, clay and phytoliths (Weiner and Goldberg, 1990). This complements the identification of the minerals using a petrographic optical microscope, which provides information on mineral grain morphology and colour.

Macroplant fragments were identified on the external morphology, for example triangular culms of sedges, and also on the internal anatomy (vascular bundle arrangement).

### 3. Results

Modern soil samples and the localities from where they were collected, the type of vegetation and type of soil, FTIR results, percentage of AIF, estimated amount of phytolith numbers per gram of AIF, and the percentage of weathered ones are listed in Table 1. Phytoliths were divided morphologically into different groups depending on the origin of the plant or plant part where they were formed: monocotyledonous plants (when it is not possible to differentiate between grasses, sedges or palms, i.e. elongate morphologies with smooth or rugose margins), grasses, sedges, palms, dicotyledonous-leaf phytoliths, dicotyledonous wood-bark phytoliths and others not determined.

#### 3.1. Mineralogy of the soil samples

The mineralogical composition of the modern soils is dominated by clay in most of the samples. In Lake Manyara and Msasa River samples the type of clay has been identified as kaolinite. Water bending at  $1630\text{ cm}^{-4}$  is noted to a higher or lesser degree in all the samples and probably corresponds to the water contained in some of these clays. Calcite is also clearly present in some samples and seems to be related to the open grassland and/or areas with no vegetation. The third mineral of importance is opal, although most of the times it appears as a shoulder of clay. The opal usually corresponds to the presence of phytoliths, and therefore when opal is noted in FTIR this relates to the phytolith presence. Quartz also appears as a shoulder of clay and its presence is not associated with high phytolith content. Finally, only in the black organic sample from Lake Manyara (Table 1) has the presence of alkali feldspar been detected.

The main differences noted between the two black organic sediments from Lake Manyara and Lake Masek are related to the major presence of clay (kaolinite) in the former and the calcite in the latter. Lake Masek sediments are distinguished because of clear calcite peaks not

observed in other samples and also reflected in the percentage of AIF.

Within each soil type the difference in percentage of AIF is fairly consistent, varying from 7% to 15%. Between soil types it varies more with the sandy-clay soils having an average AIF percentage of 88% compared to the 45% for the saline-alkaline soil, a difference of 43%. The percentage of weathered morphologies is variable with the volcanic lava soils showing the least degree of weathering and the saline-alkaline soils the most.

#### 3.2. Phytoliths from the modern soil samples

##### 3.2.1. Pyroclastic clays

The pyroclastic clay soil samples from the Leakey camp in the Olduvai Basin (Table 1, samples 1–4) were collected from two open grassland sites on shallow soils above calcrete hardpan and from the *Commiphora* open woodland under the trees which tend to grow where there is better drainage along cracks or faults in the hardpan. Samples collected from the open grassland (samples 3 and 4) showed twice the number of phytoliths than samples collected from the *Commiphora* woodland (samples 1 and 2), related, however to almost double the percentage of dissolution (weathering). The increasing dissolution rate might be related to the higher presence of calcite observed in the FTIR results (Table 1). The morphological results (Fig. 1) indicate that, contrary to expectation, monocotyledonous plants, most probably grasses, are more abundant in *Commiphora* woodland than in open grassland, although it needs to be pointed out that the grasslands also have many herbaceous dicots whereas in the *Commiphora* woodland, the dicotyledonous plants correspond mostly to the trees. At this stage of the research, it is not possible to distinguish between herbaceous and woody dicots.

The non-determined phytolith group includes big cylindroid morphologies with one of the margins echinate. This morphology has not been identified in the modern plant reference collection analysed to date. Grasses are represented mainly by bulliform cells (Fig. 2a, k) and trichomes (Fig. 2b) from the leaves, and short cells (Fig. 2c–e) that can also be found, apart from the leaves, in the inflorescences and the stems of the same plants. Long cells with echinate margins produced in the inflorescences were also noted although in low quantities (less than 2%). The morphological characteristics of the grass short cells indicated that the C3 group (Fig. 2c) was present both in the *Commiphora* woodland and in the open grassland. C4 grass phytoliths (Fig. 2d, e), however, are more common in the *Commiphora* woodland and are practically absent in the open grassland, especially those belonging to the chloridoid group (Fig. 2d). From our own collections during the dry season (June–August) modern grasses growing in the *Commiphora* woodland are *Setaria* sp. (Panicoidae, C4) and in the open grassland are *Aristida* sp. (Arundinoideae, C4), *Dactyloctenium aegyptiacum*, *Eragrostis* spp. and *Sporobolus spicatus* (Chloridoideae, C4). Overgrazing and

Table 1

Modern soil samples; from different localities and vegetation types with the soil type, FTIR analysis, percentage acid insoluble fraction (AIF), number of phytoliths per gram of AIF, percentage of weathered forms

Sample number	Localities	Vegetation type	Type of soil	FTIR <sup>a</sup>	% AIF	No. Phytoliths/ 1 g AIF	% weathered material
1	Olduvai Gorge, west of Leakey camp	<i>Commiphora</i> woodland	Pyroclastic clay	Cl, C	61.3	700 000	14.9
2	Olduvai Gorge, west of Leakey camp	<i>Commiphora</i> woodland, <i>Acacia mellifera</i> , <i>Sanseveria</i>	Pyroclastic clay	Cl, C	65.0	600 000	11
3	Olduvai Gorge, west of Leakey camp	Open grassland with herbaceous dicotyledonous plants (100 m away from sample 2)	Pyroclastic clay	Cl, C+	60.1	1 600 000	24.5
4	Olduvai Gorge, west of Leakey camp	Open grassland closer to trees with more grasses than sample 3, 78 m away from sample 1 and 360 m away from Leakey camp	Pyroclastic clay	Cl,C++	58.0	1 100 000	20
5	Lake Manyara	Open woodland, the lower and middle fan zone. <i>Phoenix reclinata</i>	Volcanic lava	Cl, C, O	61.8	15 700 000	7.1
6	Lake Manyara	Open woodland, the lower and middle fan zone. Below <i>Hyphaene petersiana</i>	Volcanic lava	Cl, C+, O	61.4	18 000 000	6.2
7	Lake Manyara	Open woodland, ground water forest in lower and middle fan zone. <i>Acacia xanthophloea</i> , <i>Senna</i> and <i>Achyranthes</i>	Volcanic lava	Cl, C, O	60.9	6 900 000	9.9
8	Lake Manyara	Open woodland, lower and middle fan zone. <i>Acacia albida</i> , grasses, <i>Achyranthes</i> and Malvaceae	Volcanic lava	Cl (kaol), C	75.5	4 800 000	5.3
9	Lake Manyara, Msasa River	Bottom of the river bed with few grasses. Seasonal water	Sandy-clay	Cl (kaol), Q	91.6	400 000	8
10	Lake Manyara, Msasa River	Bank side with herbaceous plants	Sandy-clay	Cl (kaol), Q	86.3	400 000	11.6
11	Lake Manyara, Msasa River	Top of bank side with herbaceous plants and a few trees	Sandy-clay	Cl (kaol), Q	85.7	500 000	12.5
12	Lake Manyara	Open grassland next to lake (flooded in 1997)	Waxy-clay	Cl (kaol), Q	84.6	300 000	12.8
13	Lake Manyara	Open area (seasonally no vegetation) next to lake	Black organic sediment	Cl (kaol), C, O, alkali feldspars	65.0	1 100 000	12.2
14	Lake Masek	Open area (no vegetation). First line next to the lake. Bird footprints. Roots below	Black organic sediment, saline-alkaline	Cl, C+++ , Q	63.9	—	—
15	Lake Masek	Open area (seasonally no vegetation). Second line next to the lake	Saline-alkaline	C, Cl	45.7	1 200 000	25
16	Lake Masek	Fringing grassland ( <i>Sporobolus consimilis</i> )	Sand, saline-alkaline	C, Cl	55.3	1 600 000	31.8
17	South of Lake Jipe, below Kilimanjaro	<i>Cyperus papyrus</i> and <i>Cyperus immensus</i> marsh	Sandy-clay	Cl, O	88.0	3 700 000	8.6

Samples 1–17 are used in the text and graph.

<sup>a</sup>For the FTIR results: Cl = clay; C = calcite; O = opal; Q = quartz; kaol = kaolinite.

the lack of inflorescences means that the diversity of grasses is most probably under estimated in the extant vegetation and is also poorly represented in the soil phytoliths. The accumulation of dung, weeds of disturbance and grazing

and browsing are strong evidence of animal activity concentrated under the trees.

Phytoliths characteristic of sedges (hat shape) have only been noted in sample 4. This is consistent with the ground

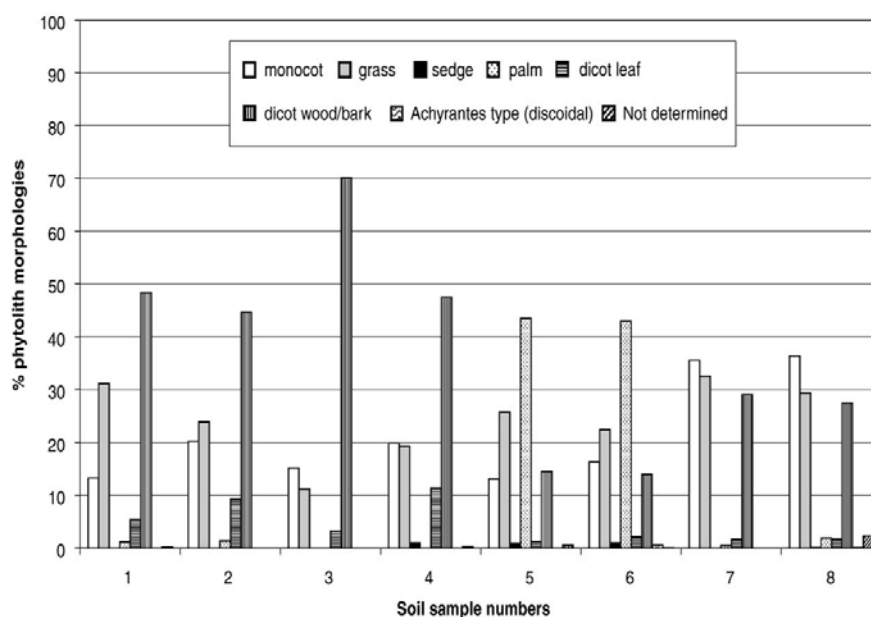


Fig. 1. Histogram showing percentages of different phytolith morphologies in modern soil samples listed in Table 1. Samples 1–4 from pyroclastic clays near the Leakey camp, Olduvai Gorge; 1–2 in *Commiphora* woodland; 3–4 in open grassland. Samples 5–8 from volcanic lava soils of Lake Manyara open woodland; 5—*Phoenix reclinata*, 6—*Hyphaene petersiana*, 7—*Acacia xanthophloea*, 8—*Acacia albida*.

54

vegetation where the small dryland sedge, *Kyllinga* sp. was observed. Nevertheless, it is important to note, that in the analysis of the living plant *Kyllinga* sp. from the same open grassland area (Bamford et al., this volume), the percentage presence of hat-shaped phytoliths was about 77%, whereas in soil samples 3 and 4, this morphological type was only noted in sample 4 and at less than 1%. Other monocot phytoliths identified were cylindroid morphologies with smooth and rugose margins (Fig. 2f, g). The relatively few multicellular structures found (only in the *Commiphora* samples) indicate that silicification was not intense enough for the individual cells to remain adherent. Note, however, that multicellular structures were not abundant either in the modern plant reference collection or in the modern soils (Bamford et al., this volume).

Dicotyledonous wood/bark phytoliths are mostly represented by parallelepiped forms, common in bark (Fig. 2h) and a few spheroid and irregular morphologies more characteristic of wood. The wood/bark phytoliths were common in the open grassland (70% and 48%) and presented a similar proportion in the *Commiphora* woodland samples (Fig. 1). The identification of dicotyledonous wood/bark phytoliths is also based on the results from the Middle East modern plant reference collection (Albert

et al., 1999, 2000, 2003; Albert and Weiner, 2001). Due to the difficulty of differentiating between phytoliths from wood and bark and until there is a complete modern plant reference collection from the greater Olduvai area, we have decided to group together the phytoliths characteristic of wood and bark.

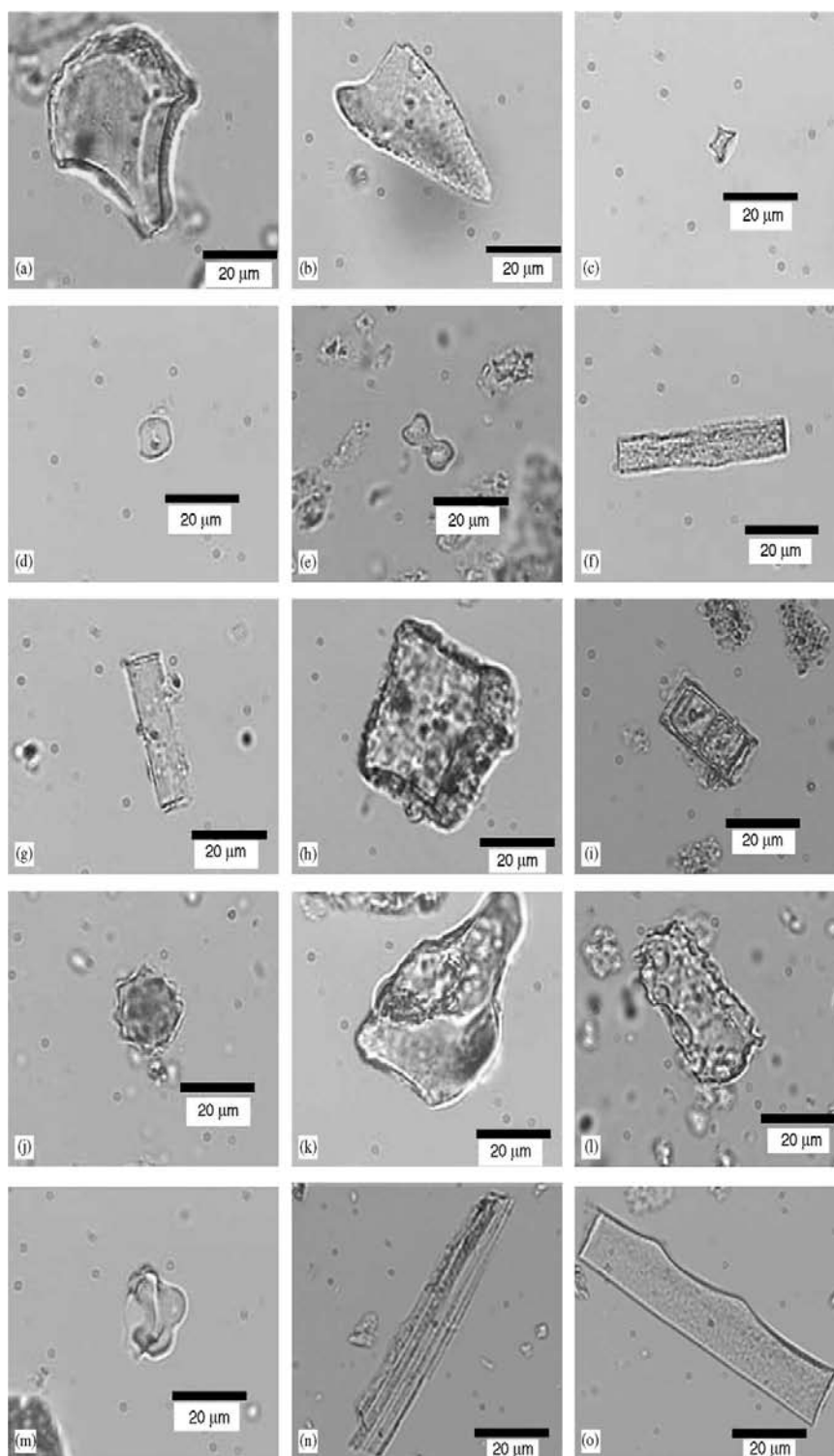
Dicotyledonous leaf phytoliths occur in all the soil samples and comprise 3–11% of the total phytolith record. They are characterised mainly by hairs, platelets and brachiforms, whereas multicellular structures with polyhedral morphologies (typical of modern leaf samples) have not been identified. One important observation was the identification of diatoms (Fig. 2i) in the *Commiphora* woodland samples indicating some degree of moisture in these soils, probably derived from the rainy season.

### 3.2.2. Volcanic lava soils

In contrast to the pyroclastic soils and despite the similar AIF percentage obtained from both areas, phytoliths are more abundant and better preserved in the volcanic lava soils from the open woodland of Lake Manyara (Table 1, samples 5–8). They are especially numerous in those samples collected from below palm trees (*Phoenix reclinata* and *Hyphaene petersiana*) (Fig. 2j). The dissolution

Fig. 2. Photomicrographs of phytoliths from modern soil samples. Pictures taken at 400 × : (a) bulliform cell from the leaves of grasses, (b) trichome from the leaves of grasses, (c) short cell from grasses C3 type, (d) short cell from grasses (saddle) from the C4 group grasses, (e) short cell bilobate from the C4 group, (f) and (g) cylindroid morphologies with smooth and rugose margin from monocotyledonous plants, (h) parallelepiped blocky morphology from dicotyledonous plants, (i) diatom, (j) spheroid echinate from palms, (k) bulliform cell from the leaves of grasses with signs of chemical alteration, (l) parallelepiped morphologies with strong signs of chemical alteration, (m) hat shape with rounded tip probably from sedges, (n) multicellular structure with long cells smooth margin from monocotyledonous plants (sedges?) and (o) parallelepiped elongate with facetated margins from monocotyledonous plants (sedges?).





percentages in these Lake Manyara samples range from 5% to 10%, which is low. Note that mineralogically these soils differ from the pyroclastic clays in showing less calcite, similar to the *Commiphora* woodland. The presence of opal, derived from phytoliths, is visible microscopically and detected in the FTIR analysis. Furthermore, the open woodland samples from below the dicot trees yielded a higher total number of phytoliths than the open grassland samples from the pyroclastic soil samples at the Olduvai Gorge Leakey camp, despite the higher production of phytoliths by modern grasses (Bamford et al., [this volume](#)).

Considering the phytolith morphological results (Fig. 1, samples 5–8), monocots (probably grasses) and phytoliths characteristic of grasses are more abundant below the dicot trees. Sedges are rare in all four samples and were not noted as a part of the living vegetation. Palm phytoliths are ubiquitous under the palm trees and rare under the dicot trees. Dicot wood/bark phytoliths, as expected, exhibit higher percentages under the dicot trees. Dicot leaf phytoliths are low in all four samples. One phytolith type (circular double ring) characteristic from *Achyranthes spicata*, a shrub which is an indicator of shady conditions, was noted in samples 6–8 (below *Hyphaene* and dicot trees). These phytoliths were present, however, in low numbers, which is consistent with the modern reference collection (Bamford et al., [this volume](#)). *A. spicata* was present in the extant vegetation in samples 7 and 8.

Looking in more detail at the suites of phytoliths that characterise the different plants, within the palms the percentage of spheroid echinate morphologies is considerably lower (15.8% in the soil sample below *P. reclinata* and 8.5% in the sample below *H. petersiana*) than that observed in the living plants (in *Phoenix* it is 27% for the leaves and above 90% for the flowers, rachis and roots, whereas in *Hyphaene* it is always above 34% with the exception of the fruits where smooth spheroid morphologies dominated the phytolith record) (Bamford et al., [this volume](#)). Grasses are represented by all their parts: phytoliths from the inflorescences represent 4–9% of the total record, (which is higher than the percentage observed in pyroclastic soil samples. C3 and C4 phytoliths from grasses (Fig. 2c–e) are present in the volcanic lava soil samples.

### 3.2.3. Sandy-clay soils

Samples collected from the Msasa River that flows into Lake Manyara, defined as sandy-clay soils, show an elevated AIF percentage (85–92%, Table 1, samples 9–11). The FTIR results indicate that this high AIF percentage is due to the major presence of the clay kaolinite, and is accompanied by quartz. These samples contain a lower number of phytoliths than both previous soil types. The dissolution percentage of phytoliths is slightly higher than the former set of samples with the exception of the one collected from the bottom of the river, which is also the sample with highest AIF percentage. The apparently lower number of phytoliths may be due to the masking effect of the kaolinite.

The sample from the river bottom (sample 9) contained a higher percentage of grass and other monocot phytoliths (Fig. 3). Sedges and palms were not seen in the vicinity of the sample sites but they are represented by very low percentages in the soil samples. Dicot wood/bark phytoliths are present in fairly low numbers in the river bottom sample and more abundant on the bank side and top whereas the dicot leaf phytolith morphologies are present in similar amounts in all three samples. Although no vegetation grows on the river bottom soils, most probably are washed in and deposited there. This accumulation would reflect the vegetation of a wider area. A variety of trees, shrubs and grasses grow in the immediate vicinity of the river.

### 3.2.4. Lake Manyara sandy/waxy clay

The last two samples from Lake Manyara (samples 12 and 13) were collected from an open area next to the lake (Table 1, Fig. 3). Sample 12 was from a grassy area and 13 from a seasonally denuded area close to the lake shore on black organic sediment. Mineralogically the waxy clay sediment (sample 12) is identical to the samples collected next to the Msasa River, in bulk mineralogical composition (major presence of the clay kaolinite), percentage of AIF and phytolith abundance (Table 1). The black organic sediment (sample 13), on the contrary, contained calcite and alkali feldspar minerals not noted in the Lake Manyara open grassland. It is interesting to note that sample 13, with some organic matter but no above ground vegetation in the dry season, showed almost three times more phytoliths than the waxy-clay (sample 12), which was below grasses and dicotyledonous plants. The presence of opal was observed in the FTIR analysis. In spite of the current difference in vegetation cover, no morphological differences were noted between these two samples (Fig. 3); both have grass and other monocot phytoliths as a major component, some dicotyledonous wood/bark phytoliths and a significant number of non-determined phytoliths including parallelepiped blocky elongate morphologies that have also not been identified in the reference collection. The presence of phytoliths in a seasonally non-vegetated area should be noted.

### 3.2.5. Saline-alkaline soils

Three samples were collected from the shores of Lake Masek (Table 1, samples 14–16) where there was little or no vegetation along the margin between low and high water lake levels. None of these samples showed an abundance of phytoliths. The AIF percentages are lower in two of these samples than any other soil type analysed here (45–55%) and they are related to a major presence of calcite noted in the FTIR results (Table 1). Sample 14 yielded no phytoliths. The dissolution percentage of phytoliths in the other two samples is high (25–32%) (Fig. 2k, l), and is associated with the calcite and water that would have increased the pH above 9 and dissolved the phytoliths. The AIF percentage, presence of calcite and

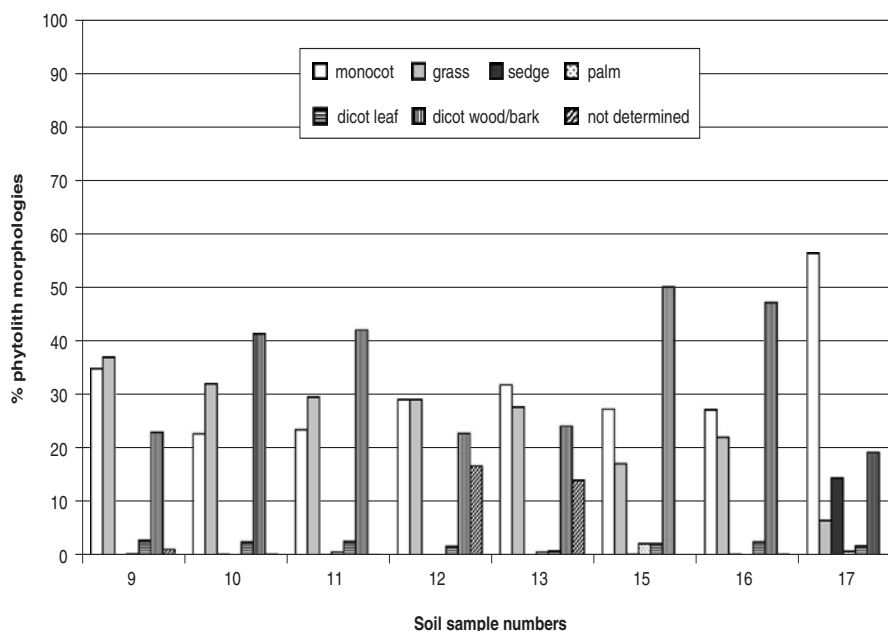


Fig. 3. Histogram showing percentages of different phytolith morphologies in modern soils listed in Table 1. Samples 9–11 from the sandy-clay soils of the Msasa River, Lake Manyara: 9—river bottom, 10—side of bank, 11—top of bank; Samples 12–13 from the shore of Lake Manyara: 12—open grassland on waxy clay, 13—black organic sediment in open area, no vegetation; Samples 15–16 from the saline-alkaline shore of Lake Masek; 15—un-vegetated, 16—fringing grassland. Sample 17—Lake Jipe sedge marsh on sandy clay.

degree of dissolution differs notably from the equivalent samples collected from Lake Manyara which, however, is more densely vegetated and presumably has fresher water than Lake Masek.

The phytolith composition is similar for samples 15 and 16 (Fig. 3) with some minor differences, such as the presence of palm phytoliths, in low amounts, in the open area but absent from the fringing grassland. In the two samples, monocotyledonous and characteristic grass phytoliths occur in similar numbers, whereas dicotyledonous wood/bark phytoliths predominate. Grass phytoliths are represented mostly by short cells and trichomes. No silica skeletons were noted. Surprisingly, sample 16 does not completely correspond to the morphological types of the leaves of *Sporobolus consimilis* (Chloridoideae, C4) which were isolated from the modern plant reference collection and is dominated (72%) by short cells of the festucoid type (C3 grasses). In this sample, collected next to this grass, short cells are represented by C3 grasses and also from C4 grasses (both panicoid and chloridoid) in similar quantities but altogether in much lower percentages (5%). A similar situation was observed, however, when analysing the modern plant reference collection for the grass *Cynodon dactylon*, (Chloridoideae, C4), where both types of short cells (C3 and C4, chloridoid) were noted (Bamford et al., this volume).

Assuming that the present vegetation has not changed significantly in the recent past, the high number of dicot

wood/bark phytoliths is surprising given the present vegetation in the area; the low number of dicot leaf phytoliths would seem to be more representative as there are no trees within several hundred metres of the sample sites. Many trees were killed by the El Niño high water stand in 1997–1998, and along some old channels dead trees can still be observed. This phenomenon has been observed in other shallow lake systems in east and southern Africa (Lake Eyasi, Lake Ngami). The vegetation has shifted several hundreds of metres over a few decades.

### 3.2.6. Sedge marsh on sandy-clay

In the sandy-clay sample from Jipe Lake (Table 1, 17; Fig. 3), collected from a marsh where *Cyperus papyrus* and *Cyperus immensus* were growing, phytoliths are numerous and relatively well preserved. The AIF percentage is high (88%) due to the major presence of clay and opal derived from phytoliths (FTIR). Percentage of dissolution is relatively low and it is similar to the other sandy-clay samples from the Msasa River.

Morphologically, grass phytoliths were present in low numbers (6%). Monocotyledonous forms probably corresponding to sedges (Fig. 2m–o) dominated the phytolith record. It is interesting to note the very low occurrence of hat-shaped phytoliths (characteristic of sedges) as individual cells, although they occur as components of multicellular structures. Cylindroid bulbous morphologies, common in some of the plant parts of the living samples

of both *C. immensus* and *C. papyrus*, have not been identified either in the soil sample. These results indicate that although hat-shaped and cylindroid bulbous morphologies are widely distributed among sedges the single components are easily dissolved, thus forming a bias in the morphological interpretation which can be only resolved by including the identification of associated morphologies. The dicot leaf and wood/bark phytolith morphologies are in low numbers in this sample (Fig. 3), which appears consistent with the modern vegetation at the site.

### 3.3. Summary

Phytolith morphologies in soils commonly represent the modern vegetation but their abundance is greatly decreased, to different degrees, depending on the mineralogical conditions of soils. Volcanic soils and lake margins with more acidic conditions are good for the preservation of phytoliths whereas pyroclastic and saline-alkaline soils are worse.

- Specific phytolith types can disappear almost completely from the soil record, independent of the mineralogical conditions of soils. This is the case of hat-shaped and cylindroid bulbous morphologies from sedges. Other morphological types such as short cells from grasses and spheroid echinates from palms remain in the soil but in lesser amounts.
- Wood/bark phytoliths are resistant and preserve well and reduce the apparent abundance of the less resistant types such as those of sedges and grasses.
- FTIR analysis helps in understanding the soil chemistry and its effect on the phytolith preservation. For example, the presence of calcite in combination with hydrological activity considerably reduces the preservation of phytoliths.
- Drainage, both palaeo and extant, is also a factor to take into account when studying the conditions for phytolith preservation. The slope and aspect of any setting should be noted so that any possible input of phytoliths from wind or water borne soils can be considered. (LMBII is flat where we sampled but some other sites are gently dipping.)

### 4. Comparison of modern plant, modern soil, and fossil phytoliths

We have selected those plants that have been identified as part of the vegetation of the modern soils studied. Table 2 shows the most characteristic morphologies identified in the modern plant reference collection, the plants and plant parts that produce them and their relative abundance, expressed as a percentage, in the living plants, modern and fossil soils. Regarding the fossil samples studied, the mineralogical analyses (FTIR) show that there

was little variation, the main minerals being alkaline feldspar or zeolite group or probably both. No evidence of clay is shown by the FTIR but XRD showed a small amount and only two samples have a significant content of calcite. Most of the phytoliths showed strong signs of chemical dissolution but some were preserved well enough for a reliable morphological interpretation (Bamford et al., this volume).

As a first observation, most of the morphologies decrease in abundance from living plant to modern soils to fossil soil. Therefore, there is a dissolution process that affects the phytolith preservation through time. Some of the morphologies present in the modern soils are absent in the fossil record. The absence of these morphotypes may be related to two different factors:

- the plants that produce this type were not there and
- the phytoliths have been dissolved/removed by some post-depositional processes.

Most of the morphologies that have “disappeared” from the fossil record were either absent or not present in high numbers in the modern soil samples (always below 1%), yet we know that some of these morphologies are produced in large numbers in the living plants (Table 2). The differential preservation of phytoliths is outlined below, but this analysis is limited by the fact that some of those found in the modern and fossil soil samples have not been identified in the reference collection.

Verrucate morphologies (elongates and parallelepipeds) were only noted in the leaves of *P. reclinata* (Table 2). These morphologies are absent from the modern soils even though they were heavily silicified and the fact that other elongate and parallelepiped morphologies are well preserved in soils. These results suggest that in this specific situation, the leaves of *P. reclinata* palms are not represented in modern soils and have not been recognised, to date, in the fossil record.

The comparison of phytoliths from all three sample sets showed the following:

- Preservation of phytoliths depends, first of all, on the degree of silicification in the plant, which at the same time is reflected in the different morphological types.
- Some morphologies, although they are produced in huge numbers in the plants, are much less abundant in the modern and fossil soil records (for example, short cells from the epidermal tissue of grasses).
- Some morphologies are produced in high numbers in plants, but they do not preserve well in the modern soils and disappear from the fossil record: cylindroid bulbous from sedges.
- Some morphologies are produced in relatively low numbers in modern plants but once they have been silicified and deposited in the soils they remain more or less stable for long periods of time (more than one

Table 2

Percentages of different morphological types in the modern plant reference collection from Olduvai Gorge (Bamford et al., 2006) and represented in the modern and fossil soils

Phytolith type	Species	Plant part	% Presence	% Average presence in modern soils	% Average presence in LMBII fossil samples
Bulliform (fan and pillow shape)	<i>Sporobolus consimilis</i>	Leaves	2	1	1
Circular double ring	<i>Achyranthes spicata</i>	Leaves	10	0.5	Absent
Cylindroid bulbous (single or in group)	<i>Cyperus immensus</i>	Stem	10	0.3	Absent
	<i>Cyperus papyrus</i>	Culm	28		
Ellipsoid smooth/rugose surface	<i>Cyperus immensus</i>	Stem	16	1	3
	<i>Cyperus immensus</i>	Leaves	19		
Elongate forms granulated surface	<i>Phoenix reclinata</i>	Leaves	52	Absent	Absent
Elongate forms smooth/rugose margin (single or in group)	<i>Cyperus immensus</i>	Stem	30	6	27
	<i>Cyperus immensus</i>	Leaves	34		
	<i>Cyperus papyrus</i>	Flowers	21		
	<i>Kyllinga</i> sp.	Whole plant	8		
	<i>Sporobolus consimilis</i>	Leaves	12		
Hair	<i>Acacia xanthophloea</i>	Leaves	4	1	1
	<i>Cyperus papyrus</i>	Flowers	17		
Hat-shaped morphologies (single or in group)	<i>Cyperus immensus</i>	Leaves	15	0.4	1
	<i>Cyperus immensus</i>	Stem	19		
	<i>Kyllinga</i> sp.	Whole plant	77		
Multicellular silicified tissue with hairs, parallelepiped thin and cylindroid bulbous	<i>Cyperus papyrus</i>	Culm	20	Absent	Absent
Multicellular silicified tissue with polyhedral morphologies	<i>Acacia xanthophloea</i>	Leaves	50	0.2	1
Parallelepiped granulated margin	<i>Phoenix reclinata</i>	Leaves	19	Absent	Absent
Parallelepiped thin rugose (single or in group)	<i>Acacia xanthophloea</i>	Leaves	20	9	23
	<i>Cyperus immensus</i>	Leaves	19		
	<i>Cyperus immensus</i>	Stem	14		
	<i>Kyllinga</i> sp.	Whole plant	3		
Parallelepiped smooth (single or in group)	<i>Hyphaene petersiana</i>	Leaves	15	1	Absent
Parallelepiped smooth & stomata cells (in group)	<i>Hyphaene petersiana</i>	Leaves	7	Absent	Absent
Parallelepiped elongates with hat shape in groups	<i>Cyperus papyrus</i>	Flowers	14	Absent	Absent
	<i>Cyperus immensus</i>	Leaves	7		
Trichome	<i>Sporobolus consimilis</i>	Leaves	1	5	2
Short cell	<i>Sporobolus consimilis</i>	Leaves	72	6	4
Silica Skeleton long cells smooth	<i>Sporobolus consimilis</i>	Leaves	1	0.4	6
Spheroid echinates (single or in group)	<i>Phoenix reclinata</i>	Leaves	27	15	31
	<i>Phoenix reclinata</i>	Flower, rachis, roots	>90		
	<i>Hyphaene petersiana</i>	Leaves, flower, rachis	35–43		
Spheroid smooth/rugose (single or in group)	<i>Hyphaene petersiana</i>	Rachis, flowers	31–52	6	3
	<i>Hyphaene petersiana</i>	Fruits	95		
Stomata cells (single or in groups)	<i>Cyperus papyrus</i>	Culm	31	0.3	0.01
	<i>Sporobolus consimilis</i>	Leaves	9		
Tracheary	<i>Hyphaene petersiana</i>	Flowers	3	0.3	1
	<i>Phoenix reclinata</i>	Flower	4		

The % average presence in modern and fossil soils was calculated and divided by the total number of appearances in the different samples.

million years). They are indicative of plant parts and specific families (e.g. bulliform cells from grass leaves). (e) Elongate morphologies with smooth surfaces tend to become rugose as a result of post-depositional processes. This fact has been already observed in a modern plant reference collection from Israel (Albert and Weiner, 2001).

The macroplants have been identified using a 40 × hand lens to determine their internal anatomy but there is a large proportion of them that are unidentifiable without the preparation of thin sections or scanning electron microscopy. The external morphology was only found to be reliable in identifying the triangular sedge culms; cylindrical or irregularly shaped forms were found to be grasses, sedges, dicots or monocots (when it was not possible to distinguish between grasses and sedges). No palm forms were noted.

### 5. Development of taphonomic model

The taphonomy of angiosperm leaves has been studied extensively (Ferguson, 1985; Burnham, 1989; Gastaldo et al., 1989; Martín-Closas and Gomez, 2004) and the relative durability of plant tissues is known (Cleal, 1991) but less is known about the taphonomy of phytoliths. Phytoliths dissolve in basic conditions with pH above 9 (Benayas, 1963; Piperno, 1988), especially when combined with constant hydric conditions that keeps the pH elevated for long periods of time (Albert et al., 1997, 2000, 2003), but little is known about other mineralogical or taphonomic conditions that can affect the durability of phytoliths. Here, we develop a model based on the observations above for the phytoliths and also outline a comparative model, based on a variety of other works as well as field observations, for the macroplants. The term “preservation” is used here to mean long-lasting survival, without alteration, and the term “petrification” to include chemical alteration resulting in long-lasting survival. Silicification is one form of petrification.

In the natural environment where plants are growing in the soils, rain falls seasonally, resident and migrating animals graze or browse on the plants, plants die and new ones grow, we can assume that there are two cycles in progress, one is the phytolith silica cycle and the other is the macroplant silicification process.

#### 5.1. Phytolith silica cycle

1. Living plants take up monosilicic acid from the moist soil and deposit silica in various cells.
2. Either as a factor of age, increase in humid conditions that favour the heavier silicification of plant cells, or physical attributes of the plant, some phytoliths are robust and some are fragile.
3. Plants are eaten by browsers or grazers and removed from the immediate environment or re-deposited in dung.

4. Some plant parts are present year-round (wood, bark, some leaves) whereas others only appear seasonally (flowers, seeds).
5. The plant dies and disintegrates, leaving the robust and fragile phytoliths in the soil.
6. Phytoliths from the wood and bark of trees will be deposited after the death of the tree or branch. Herbaceous plants, with a shorter life cycle, on the contrary, will be deposited in the soil more frequently. Herbaceous dicots occur in grassland, shrubland and woodland, i.e. are widespread. Trees are confined to woodlands. Their phytoliths should reflect their distribution.
7. It can be assumed then, that herbaceous (monocot and dicot) phytoliths are more abundant than woody dicots in soils.
8. External environmental processes remove or deposit some soil and phytoliths (wind, water erosion) or increase the silica content of the soil e.g. volcanic ash fallout. Since phytoliths become part of the soil, only where soils accumulate will there be an accumulation of phytoliths from other areas.
9. Soil processes (alkalinity, ground water movement, recycling by new roots) can destroy some of the phytoliths, partially dissolve or do not affect the phytoliths.
10. New plants continuously inhabit an undisturbed habitat or eventually recolonise a disturbed habitat, resulting in a net accumulation of phytoliths.
11. The cycle repeats.

There can be a net input of silica, a net loss or equilibrium. In a silica-rich environment such as the Olduvai Basin we do not think that silica would ever be a limiting factor for the formation of phytoliths. The number of phytoliths in the soil will be less than that produced by one generation of vegetation but they would accumulate over hundreds or thousands of years in a stable environment.

#### 5.2. Macroplant silicification process

1. Plants die and disintegrate into leaves, stems, seeds, trunks and roots, most organic parts being recycled by fungi, bacteria and arthropods in a sub-aerial environment.
2. The more robust parts of plants (wood fragments, stems or seeds) are sometimes transported and buried in a saturated anoxic environment, such as a pond or river bank, thus greatly reducing the rate of decomposition.
3. In a monosilicic acid saturated environment where the buried organic material is beginning to decompose so is negatively charged, it attracts the  $Si_2^+$  ions and is slowly replaced by silica. (Duration of process unknown but could be quick in certain conditions).
4. New plants inhabit the same environment or the recently deposited sediments.
5. The cycle repeats.

The petrified proportion of the total original vegetation is probably very small, but in such a silica-rich environment such as the Olduvai Basin, we would expect that all the plant fragments that are buried would have a good chance of being petrified. The cycles of burial are probably not seasonal but more likely to be catastrophic events such as mud slides, so called “hundred year” floods or El Niño events.

Assuming that the sediments have not been reworked and based on these two models we would expect the following:

1. Phytoliths are inorganic, internally silicified cells, and do not need to undergo any petrification process. Macroplants are organic and time and suitable conditions are required for the replacement of organic material by mineral silica—petrification.
2. Phytoliths represent a continuous record of vegetation whereas macroplant fossils represent burial (flood) events only.
3. Despite some external factors (wind, water erosion, etc.), phytoliths represent, in general, the immediate vegetation (autochthonous) and macroplant fragments represent transported vegetation (allochthonous or parautochthonous).
4. Phytoliths represent the soft tissues of all herbaceous and woody vegetation (i.e. a greater diversity of plants) whereas the macrofossils represent only the more robust plant parts (low diversity).
5. Post depositional conditions such as ground water movement or change in pH, or root acids, will dissolve or destroy some of the phytoliths but do not affect the already silicified plant fragments.
6. Phytoliths and macroplants are not always expected to be correlated but the presence of each can be complementary and interpreted as such.

As far as we can tell, the main filters (removal of plant material from the preservation cycle) that would introduce biases for phytolith preservation occur at two stages in the cycle. The first stage is between death of the plant and incorporation of phytoliths into the soil. Leaves of trees and grasses are the parts eaten by animals, so depending on the grazing/browsing pressure, these parts of the plants may be under-represented in the record. Some of the leaf material may be returned to the soil in the form of dung but this is usually recognised either by micromorphology or by the identification of faecal spherulites produced by herbivore ruminants when the soil conditions are adequate (Brochier et al., 1992; Canti, 1997, 1998, 1999; Korstanje, 2002; Shahack-Gross et al., 2002; Albert and Henry, 2005). Edible pods and seeds would suffer the same fate as the leaves but thorns should be well represented, as should the bark and wood. Nevertheless, as already pointed out, the bark and the wood of trees will only be represented in the soil after the death of the tree, which does not occur with the same frequency. No work has been done on

phytoliths from roots. Ground vegetation cover, although it will be eaten by certain grazers, is unlikely to disappear completely from the soil phytolith record.

The second filter is post depositional and includes the affects of the soils and soil processes on the phytoliths. Different soils are formed from different parent materials and under different conditions and factors such as fluctuating ground water, pH, chemical composition and bioturbation can dissolve phytoliths partially or completely but may have less of an effect on larger (with respect to the phytoliths) silicified plants.

## 6. Conclusion

### 6.1. Re-interpretation of fossil samples from Olduvai Gorge

As a test case, we consider the phytolith and macroplant samples from LMBII from the eastern palaeolake and at different localities (FLKN, HWKE, HWKEE, VEK and MCK). The phytolith morphological results from each fossil sample (Fig. 4) are compared to the macroplant results (Table 3) and the modern soil samples and interpreted using the taphonomic information above, where the sedge phytoliths are most likely to be under-represented, the palm phytoliths are likely to be a reasonably accurate representation and the dicot phytoliths are likely to be over-represented. Thus, taking both phytoliths and macroplants into account for these well-constrained deposits, the overall interpretation of the palaeovegetation is re-assessed

### 6.2. FLKN

This locality is the most westerly one within the eastern palaeolake margin where most of the research to date has been concentrated. From FLKN (trench 116), the only sample with a minimum amount of phytoliths for a reliable interpretation showed the presence of monocotyledonous plants (grasses) and dicotyledonous plants. Phytoliths from these samples showed strong signs of chemical dissolution. Macroplants are represented by roots and biogenic tubules and can only be interpreted as there having been a vegetated surface and, if the biogenic tubules were formed by invertebrates such as termites, then the ecosystem was well established and complex. Comparing the phytolith presence with the modern soils samples (Fig. 4), the closest in vegetation type would be the open woodland from Lake Manyara (sample 7) where monocots and grasses dominate the phytolith record. Trees would not have been abundant and the vegetation would then have been dominated by monocotyledonous plants and fewer herbaceous dicots during LMBII times (ca. 1.785 myr).

### 6.3. HWKE and HWKEE

Samples from HWKE, trench 115, the palaeolake margin, showed a relatively significant number of phytoliths

where dicotyledonous plants dominate the phytolith record followed by grasses. No macroplant fossils were found. The phytolith assemblage is similar to that from open grassland sample from Olduvai Leakey camp (sample 3), that was dominated by herbaceous vegetation and some *Commiphora* trees (Fig. 4). We interpret the palaeovegetation to be open woodland with dicotyledonous trees and a mixture of grasses and herbs. Sedges may have been present but would be few in number and have not been preserved. The amount of palms is too low but it suggests that these plants would be present in the vicinity of trench 115.

If the macroplant record from HWKEE, trench 107, in the earthy and siliceous earthy claystone layer from 52–92 cm above tuff IF (plant level 3b) is considered first, it shows a rich diversity of plants from a wetland with at least three species of sedge, two grasses, unknown

Table 3

Percentages of macroplant specimens belonging to the different plant groups from fossil soils in Olduvai gorge, lowermost bed II, eastern palaeolake margin

Localities	HWKEE Tr-107	MCK Tr-108
Plant groups (%)	Level 3b plants	Level 7 plants
Sedge	5.9	18.6
Grass	4.1	
Monocot	20.0	6.6
Palm		
Dicot wood/bark	1.8	
Dicot leaves		
Other	62.3	74.6
Total number <sup>a</sup>	170	75

<sup>a</sup>The total number of specimens recovered from that level within the 2 m trench.

62

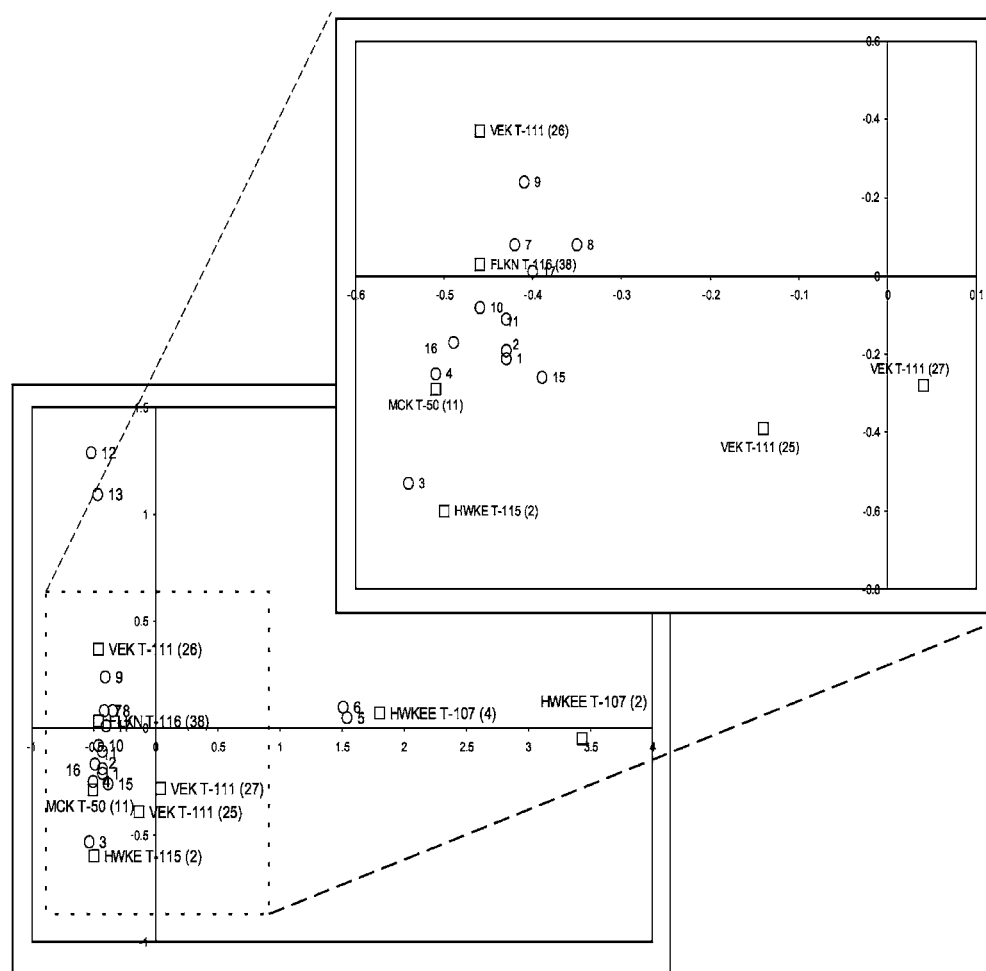


Fig. 4. Results from the correspondence analysis in  $x$ - $y$  graphic. Modern soil samples are plotted as circles and palaeoanthropological samples as squares. Soil samples: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 15, 16, 17; palaeoanthropological samples: FLKN T-116 (38), HWKE T-115 (2), HWKEE T-107 (2), HWKEE T-107 (4), VEK T-111 (25), VEK T-111 (26), VEK T-111 (27), MCK T-50 (11).



monocots and several dicots (Table 3). Amongst the large number of unidentified plant fragments, there could well be some more dicot and monocot species represented. From our own field observations, we know that the diversity of sedges likely to be preserved in the mud of a typical African wetland is only a fraction of the true diversity (1 of 20 sedge species, 1 of 12 grasses and 1 of 6 dicots; Bamford and Peters, in preparation).

Considering the phytoliths from the same level (HWKEE, trench 107, sample 4, above the calcareous nodular horizon) sedges are absent, and in descending order of abundance are palms, monocots, grasses and dicots. This phytolith assemblage is most similar to the modern soil samples 5 and 6 which are from grassland with clumps of palms spread throughout (Fig. 4). Beneath the clumps are several shrubs and there were signs of animals having rested amongst the vegetation. When the macroplant record is added it shows that sedges were present too and implies that the palaeovegetation was probably denser and richer than the modern analogue.

The sample below 4, sample 2, from this trench shows an overwhelming dominance of palm phytoliths followed by low numbers of monocots, dicots and grasses with no comparison among the modern soil samples (Fig. 4). No macroplants were recovered from this level. (The level below this which is below the calcareous nodular layer and 5 cm above tuff IF, contained no macroplants and too few phytoliths to interpret.) Dicotyledonous leaf phytoliths were also noted and sedges were uncommon. The reinterpretation of this sequence of vegetation is that the palms were more common and their numbers and density reduced over time as the climate dried out and canopy cover was reduced to more open grassland.

#### 6.4. VEK

Below the calcareous nodular layer in VEK (trench 111) phytoliths occurred in low numbers, whereas above this layer, they were relatively abundant and well preserved (sample 27), which is the same pattern as in the HWKEE samples. The VEK samples were dominated by monocots and dicots in different amounts. Spheroid echinate morphologies from palms were less numerous than in both the HWKEE and modern reference samples. Only roots and biogenic tubules (unidentifiable silicified tubes sensu; Bamford et al., this volume) occur above tuff IF at this locality. Pollen samples from just above tuff IF indicated predominantly grasses, few sedges, few Sudano-Zambezian elements and Afromontane taxa (Bonnefille, 1984). The phytolith record of sample 25 is closer to that of the modern sample 15 from the Lake Masek margin with saline tolerant grasses. The fossil site is interpreted as having had a variety of trees or shrubs in a mixed grass and sedgeland but was subject to lake inundation and tree dieback. This locality had more palms and sedges than HWKE trench 115 (2) sample which might be explained by the fact that it was farther from the palaeolake.

Sample 26 is higher up and younger and has a reduction in the wood/bark phytoliths with a corresponding increase in monocots and grasses. This implies no palms, fewer trees, shrubs or herbs and a more open grass-(sedge). Sample 27 shows a shift back to more dicots, but still has lots of monocots, grasses, sedges and palms in the vicinity. The shifts could be a result of climatic shifts such as moister to drier to moister which occur with lake level fluctuations of low, high, low. If that is the case, then the lake levels are out of synchrony with the rainfall.

#### 6.5. MCK

Finally, in phytolith samples from MCK (trench 50, sample 11), in the waxy brown claystone sample, dicotyledonous plants were dominant, followed to a lesser degree by monocots and grasses. The other samples from MCK contained too few phytoliths for a reliable interpretation of the plants represented. Macroplants were recovered from another trench in MCK, trench 108, in level 7, (just above tuff IF and equivalent to this phytolith sample). Most of the macroplants were unidentified but sedges and monocots are present (Table 3). The interpretation of the paleovegetation for this sample would be comparable to that of the open grassland (sample 4) from Olduvai Leaky camp, with monocots, sedges and herbs and few trees in the surroundings but much more species rich.

The palaeovegetation reconstruction of the eastern palaeolake margin of Olduvai Gorge during LMBII times, when phytolith and microfossil taphonomy are taken into consideration shows that the vegetation varied over small distances (100–200 m) and over relatively short periods of time. The palaeovegetation was also much more diverse and species rich than has been interpreted from other data such as faunal and isotopic analyses. It is possible to reconstruct the vegetation on a small spatial and temporal scale and apply the data to the facet-level models developed by Blumenshine and Peters (1998) for predicting hominin land use. The fine scale sampling of fossil plants and phytoliths can now be applied to other stratigraphic levels and localities, using and expanding the modern plant and soil reference collections, to reconstruct more of the palaeovegetation.

#### Acknowledgements

We thank COSTEC for permission to carry out research at Olduvai Gorge, the excavators and members of OLAPP for assistance in the field, Marta Portillo of the University of Barcelona for preparing the phytolith samples, and Rob Blumenshine for useful discussions. The Ministerio de Ciencia y Tecnología (Spain) is acknowledged for financial support to RMA for the acquisition of the material necessary to perform the digital image data base catalogue and to process the modern soil samples (Ref. BSO2002-12596-E). Financial support was gratefully received from the NSF (SBR-0109027) to OLAPP, and from

Palaeoanthropological Scientific Trust (PAST), South Africa to MKB for actualistic studies in East Africa and South Africa.

## References

- Albert, R.M., 2000. Study of ash layers through phytolith analyses from the Middle Palaeolithic levels of Kebara and Tabun caves. Ph.D. Thesis, Universitat de Barcelona, Barcelona.
- Albert, R.M., Weiner, S., 2001. Study of phytoliths in prehistoric ash layers using a quantitative approach. In: Meunier, J.D., Coline, F. (Eds.), *Phytoliths: Applications in Earth Sciences and Human History*. A.A. Balkema Publishers, Lisse, pp. 251–266.
- Albert, R.M., Henry, D., 2005. Herding and agricultural activities at the early Neolithic site of Ayn AbŪ Nukhayla (Wadi Rum, Jordan). The results of phytolith and spherulite analyses. *Paléorient* 30/2, 81–92.
- Albert, R.M., Mangado, X., Martín, A., 1997. Study about phytolith preservation in calcareous sediments. Analysis of a stratigraphic column from Cova del Frare (Matadepera, Barcelona). Estudio actual de los estudios de fitolitos en suelos y plantas. Monografías 4. Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Madrid, Spain, pp. 187–196.
- Albert, R.M., Tsatskin, A., Ronen, A., Lavi, O., Estroff, L., Lev-Yadum, S., Weiner, S., 1999. Mode of occupation of Tabun cave, Mt Carmel, Israel during the Mousterian period: a study of the sediments and phytoliths. *Journal of Archaeological Science* 26, 1249–1260.
- Albert, R.M., Weiner, S., Bar-Yosef, O., Meignen, L., 2000. Phytoliths in the Middle Palaeolithic deposits of Kebara Cave, Mt Carmel, Israel: study of the plant materials used for fuel and other purposes. *Journal of Archaeological Science* 27, 931–947.
- Albert, R.M., Bar-Yosef, O., Meignen, L., Weiner, S., 2003. Phytolith and mineralogical study of hearths from the Middle Palaeolithic levels of Hayonim cave (Galilee, Israel). *Journal of Archaeological Science* 30, 461–480.
- Bamford, M.K., 2005. Early Pleistocene fossil wood from Olduvai Gorge, Tanzania. *Quaternary International* 129, 15–22.
- Bamford, M.K., Albert, R.M., Cabanes, D., 2006. Plio-Pleistocene macroplant fossil remains and phytoliths from Lowermost Bed II in the eastern palaeolake of Olduvai Gorge, Tanzania. *Quaternary International*, this volume, doi:10.1016/j.quaint.2005.11.027.
- Benayas, J., 1963. Disolución parcial de sílice orgánica en suelos. *Anales de Edafología y Agrobiología* tomo XXII (11–12), 623–626.
- Berlin, A.M., Ball, T., Thompson, R., Herbert, S.C., 2003. Ptolemaic agriculture. "Syrian Wheat" and *Triticum aestivum*. *Journal of Archaeological Science* 30, 115–121.
- Blinnikov, M.S., 2005. Phytoliths in plants and soils of the interior Pacific Northwest, USA. Review of Paleobotany and Palynology 135, 71–98.
- Blumenschine, R.J., Peters, C.R., 1998. Archaeological predictions for hominid land use in the Palaeo-Olduvai Basin, Tanzania, during lowermost bed II times. *Journal of Human Evolution* 34, 565–607.
- Blumenschine, R.J., Peters, C.R., Masao, F.T., Clarke, R.J., Deino, A.L., Hay, R.L., Swisher, C.C., Stanistreet, I.G., Ashley, G.M., McHenry, L.J., Sikes, N.E., van der Merwe, N.J., Tactikos, J.C., Cushing, A.E., Deocampo, D.M., Njau, J.K., Ebert, J.I., 2003. Late Pliocene Homo and hominid land use from western Olduvai Gorge, Tanzania. *Science* 299, 1217–1221.
- Bonnefille, R., 1984. Palynological research at Olduvai Gorge. *National Geographic Society Research Reports* 17, 227–243.
- Bozarth, S.R., 1992. Classification of opal phytoliths formed in selected dicotyledons native to the Great Plains. In: Rapp, Jr., G., Mulholland, S.C. (Eds.), *Phytolith Systematics. Emerging Issues, Advances in Archaeological and Museum Science*. Plenum Press, New York, pp. 193–214.
- Brochier, J., Villa, P., Giacommarra, M., 1992. Shepherds and sediments: geo-ethnoarchaeology of pastoral sites. *Journal of Anthropological Archaeology* 11, 47–102.
- Brown, D.A., 1984. Prospects and limits of a phytolith key for grasses in the central United States. *Journal of Archaeological Science* 11, 345–368.
- Burnham, R.J., 1989. Relationships between standing vegetation and leaf litter in a pantropical forest: implications for palaeobotany. *Review of Palaeobotany and Palynology* 58, 5–32.
- Canti, M., 1997. An investigation of microscopic calcareous spherulites from herbivore dung. *Journal of Archaeological Science* 24, 219–231.
- Canti, M., 1998. The micromorphological identification of faecal spherulites from archaeological and modern materials. *Journal of Archaeological Science* 25, 434–444.
- Canti, M., 1999. The production and preservation of faecal spherulites: animals, environment, and taphonomy. *Journal of Archaeological Science* 26, 251–258.
- Cleal, C.J., 1991. Plant fossils in geological investigation. *The Palaeozoic. Ellis Horwood Series in Applied Geology* 233pp.
- Ferguson, D.K., 1985. The origin of leaf assemblages—new light on an old problem. *Review of Palaeobotany and Palynology* 46, 117–144.
- Fredlund, G.G., Tieszen, L.L., 1997. Calibrating grass phytolith assemblages in climatic terms: application to late Pleistocene assemblages from Kansas and Nebraska. *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology* 136, 199–211.
- Gastaldo, R.A., Bearce, S.C., Deges, C., Hunt, R.J., Peebles, M.W., Violette, D.L., 1989. Biostratigraphy of a Holocene oxbow lake: a backswamp to mid-channel transect. *Review of Palaeobotany and Palynology* 58, 47–59.
- Hay, R.L., 1976. *Geology of Olduvai Gorge*. University of California Press, Berkeley.
- Hay, R.L., 1996. Stratigraphy and lake-margin palaeoenvironments of lowermost bed II in Olduvai Gorge, Kaupia (Darmstadter Beiträge zur Naturgeschichte) 6, 223–230.
- Jones, L.H., Beavers, A.H., 1963. Some mineralogical and chemical properties of plant opal. *Soil Science* 96, 375–379.
- Korstanje, A., 2002. Microfossils in camelid dung: taphonomic considerations for the archaeological study of agriculture and pastoralism. In: O'Connor, T.T. (Ed.), *Biosphere to Lithosphere*. Ninth ICAZ Conference, Durham, pp. 69–77.
- Leakey, L.S.B., 1967. *Olduvai Gorge 1951–1961 Volume 1. A Preliminary Report on the Geology and Fauna*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Madella, M., Jones, M.K., Goldberg, P., Goren, Y., Hovers, E., 2002. The exploitation of plant resources by Neanderthals in Amud cave (Israel): the evidence from phytolith studies. *Journal of Archaeological Science* 29, 703–719.
- Madella, M., Alexandre, A., Ball, T., 2005. International code for phytolith nomenclature 1.0. *Annals of Botany* 96, 253–260.
- Martín-Closas, C., Gomez, G., 2004. Taphonomie des plantes et interprétations paléocéologiques. Une synthèse. *Geobios* 37, 65–88.
- Mercader, J., Runge, F., Vrydaghs, L., Doutrelepon, H., Corneile, E., Juan-Treserras, J., 2000. Phytoliths from archaeological sites in the tropical forest of Ituri, Democratic Republic of Congo. *Quaternary Research* 54, 102–112.
- Mulholland, S.C., Rapp Jr., G., 1992. A morphological classification of grass silica-bodies. In: Rapp Jr., G., Mulholland, S.C. (Eds.), *Phytolith Systematics. Emerging Issues, Advances in Archaeological and Museum Science*. Plenum Press, New York, pp. 65–89.
- Ollendorf, A.L., 1992. Toward a classification scheme of sedge (Cyperaceae) phytoliths. In: Rapp Jr., G., Mulholland, S.C. (Eds.), *Phytolith Systematics. Emerging Issues, Advances in Archaeological and Museum Science*. Plenum Press, New York, pp. 91–111.
- Ollendorf, A.L., Mulholland, S.C., Rapp Jr., G., 1987. Phytoliths from some Israeli sedges. *Israel Journal of Botany* 36, 125–132.
- Pearsall, D.M., Chandler-Ezell, K., Zeidler, J.A., 2004. Maize in ancient Ecuador: results of residue analysis of stone tools from the Real Alto site. *Journal of Archaeological Science* 31, 423–442.

- Peters, C.R., Blumenshine, R.J., 1995. Landscape perspectives on possible land use patterns for Early Pleistocene hominids in the Olduvai Basin, Tanzania. *Journal of Human Evolution* 29, 321–362.
- Piperno, D.R., 1988. *Phytolith Analysis: An Archaeological and Geological Perspective*. Academic Press, San Diego.
- Rosen, A.M., Weiner, S., 1994. Identifying ancient irrigation: a new method using opaline phytoliths from emmer wheat. *Journal of Archaeological Science* 21, 125–132.
- Runge, F., 1999. The opal phytolith inventory of soils in central Africa—quantities, shapes, classification, and spectra. *Review of Palaeobotany and Palynology* 107, 23–53.
- Shahack-Gross, R., Marshall, F., Weiner, S., 2002. Geo-ethnoarchaeology of pastoral sites: the identification of livestock enclosures in abandoned Maasai settlements. *Journal of Archaeological Science* 30, 439–459.
- Twiss, P.C., Suess, E., Smith, R.M., 1969. Morphological classification of grass phytoliths. *Soil Science Society of America* 33, 109–115.
- Weiner, S., Goldberg, P., 1990. On-site Fourier transform-infrared spectrometry at an archaeological excavation. *Spectroscopy* 5, 46–50.
- Zucol, A.F., Brea, M., Scopel, A., 2005. First record of fossil wood and phytolith assemblages of the Late Pleistocene in El Palmar National Park (Argentina). *Journal of South American Earth Sciences* 20, 33–43.

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI

L'ESTUDI DELS PROCESSOS DE FORMACIÓ DELS SEDIMENTS ARQUEOLÒGICS

I DELS PALEOSÒLS A PARTIR DE L'ANÀLISI DELS FITÒLITS , ELS MINERALS I ALTRES MICRORESTES

Dan Cabanes i Cruelles

ISBN:978-84-692-1535-7/DL-T-378-2009

**4.2. Plio–Pleistocene macroplant fossil remains  
and phytoliths from Lowermost Bed II in the  
eastern palaeolake margin of Olduvai Gorge,  
Tanzania**

67

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI

L'ESTUDI DELS PROCESSOS DE FORMACIÓ DELS SEDIMENTS ARQUEOLÒGICS

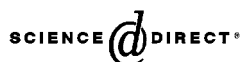
I DELS PALEOSÒLS A PARTIR DE L'ANÀLISI DELS FITÒLITS , ELS MINERALS I ALTRES MICRORESTES

Dan Cabanes i Cruelles

ISBN:978-84-692-1535-7/DL-T-378-2009



Available online at [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)



Quaternary International 148 (2006) 95–112

## Plio–Pleistocene macroplant fossil remains and phytoliths from Lowermost Bed II in the eastern palaeolake margin of Olduvai Gorge, Tanzania

Marion K. Bamford<sup>a,\*</sup>, Rosa M. Albert<sup>b</sup>, Dan Cabanes<sup>c</sup>

<sup>a</sup>Bernard Price Institute for Palaeontological Research, School of Geosciences, University of the Witwatersrand, P Bag 3, WITS 2050, South Africa

<sup>b</sup>Research Group for Paleocological and Geoarchaeological Studies, Seminari d'Estudis i Recerques Prehistòriques, Dept. de Prehistòria,

Història Antiga i Arqueologia, Torre B, pis 11, Universitat de Barcelona, Spain

<sup>c</sup>Department of Prehistory, University Rovira i Virgili, Tarragona, Spain

Available online 30 January 2006

### Abstract

Fossil macroplants and phytoliths occur in the sediments of the palaeoanthropological site of Olduvai Gorge, northern Tanzania. Current research on hominin land use in the Basin during the Plio–Pleistocene has a strong palaeoenvironmental emphasis on the palaeovegetation in particular. The occurrence of macroplants and phytoliths at Olduvai, and their usefulness and reliability for palaeovegetation interpretation are assessed here for the first time. Modern reference collections from analogous environments have been established and used to identify the fossil taxa from the eastern palaeolake margin of Lowermost Bed II as the test case for very detailed spatially and temporally constrained vegetation reconstruction. Fourier Transform Infrared Spectrometry (FTIR) analysis was used to identify the minerals of the fossil sediments. Modern plants produce more phytoliths than are preserved in the fossil soils but there were sufficient numbers to show diverse and changing vegetation over short time periods. Silicified macroplant fragments of sedge culms and dicot stems occur with phytoliths, but do not always represent the same plant taxa. A more complex flora was shown when using both forms of fossil plants. During Lowermost bed II times, at the locality of FLKN monocots and dicots occurred, indicating the presence of marshland and grassland after the deposition of Tuff IF. At VEK, the phytoliths indicate a shift in dominance from dicots to monocots to a mixture of the two and including palms. At HWKEE, initially palms dominated then there was a mixture of palms, grasses and dicots. The vegetation at MCK comprised dicots, monocots sedges and grasses. This detailed vegetation data complements the more broad scale vegetation interpretations that have been deduced from the pollen, isotopes and faunal data sets.

© 2005 Elsevier Ltd and INQUA. All rights reserved.

### 1. Introduction

Olduvai Gorge in northern Tanzania is a well-known site with a rich vertebrate fossil record including hominins and stone artefacts from Plio–Pleistocene lacustrine and tuffaceous deposits (Leakey, 1971; Hay, 1976; Potts, 1988; Blumenschine et al., 2003). Current multidisciplinary research by the Olduvai Landscape Palaeoanthropology Project (OLAPP) is focussed on reconstructing the land use patterns of the hominins, who produced Oldowan stone artefacts during Bed I and lowermost Bed II times (LMBII), ca. 1.85–1.79 myr. This work combines sampling

of hominin activity traces over broad spatial scales, throughout exposed deposits of the Plio–Pleistocene Olduvai lake Basin with detailed palaeoenvironmental analysis focussing on terrain, hydrology and vegetation (Blumenschine, 1989; Blumenschine and Masao, 1991; Peters and Blumenschine, 1995, 1996; Blumenschine and Peters, 1998; Blumenschine et al., 2003). Models of palaeo-landscape ecology and hominin land use highlight the central role of the landscape distribution and cover abundance of herbaceous and woody vegetation in determining the landscape distribution and nature of hominin activities throughout the lake margin and alluvial fan landscapes of the central Olduvai Basin.

Previous studies based on the pollen spectra, carbon isotopes and faunas have provided a general picture of the

\*Corresponding author. Tel.: +27 11 717 6690; fax: +27 11 403 1423.

E-mail address: [bamfordm@geosciences.wits.ac.za](mailto:bamfordm@geosciences.wits.ac.za) (M.K. Bamford).

palaeoenvironment and vegetation. A shift from more wooded vegetation cover during middle and upper Bed I times to more open vegetation by uppermost Bed I, to woodland mosaics in lower Bed II have been interpreted from the occurrence of the pollen of the montane tree *Olea*, and the drier Sudano-Zambezian taxa such as the Cappariaceae, Amaranthaceae and Combretaceae (Bonfille, 1984). For the time period studied here, only the pollen samples from localities VEK and FLK were productive (Fig. 1).

Carbon isotopes from Bed I and lowermost Bed II indicate that the C3 pathway dominated, which implies that the vegetation was mostly trees and shrubs or that there were more higher altitude grasses (Cerling and Hay, 1986; Sikes, 1994). Carbonate layers, however, are formed after the soils and can be affected by fresh versus saline-alkaline ground waters (Hay and Reeder, 1978). The samples collected by Sikes (1994) were from basal Bed II near HWK and FLK, the palaeolake margin,

and interpreted as supporting a riparian forest to grassy woodland.

Using micro-mammal composition and taphonomic factors, Fernández-Jalvo et al. (1998) showed that the middle Bed I vegetation was more complex than any flora today and comprised dense canopy woodland and rich bush and ground cover. By upper Bed I times the vegetation was woodland in a savanna biome.

An increase in bovids that inhabit more open and arid habitats was found below Tuff IF in uppermost Bed I, indicating a drying trend (Shipman and Harris, 1988; Kappelman, 1984). This is further supported by the bovid ecomorphological approach used by Kappelman et al. (1997) and Plummer and Bishop (1994). All these data show that there were more woody (closed) and more grassy (open) landscapes at different times, in general, indicating an increase in more open and drier conditions throughout the Bed I and Lower Bed II sequence.

A more precise picture of the vegetation is required in order to be able to predict when and where the hominins performed various activities. Using contrasting landscapes, Peters and Blumenshine were able to develop basin-wide ranging patterns for the two hominin species, one herbivorous and one omnivorous. Subsequently, Blumenshine and Peters (1998) formulated predictions of the density and composition of vertebrate fossil and stone artifact assemblages that could be recovered for each hypothesized palaeolandscape facet. These predictions were based on a series of principles of ecological archaeology, and on two environmental variables (Peters and Blumenshine, 1995, 1996; Blumenshine and Peters, 1998). These are the landscape facet-specific *cover abundance of trees and shrubs*, and the degree of competition amongst carnivores and hominids for scavengeable carcass parts. The density and distribution of bone and stone remains can then be used to test the model for predicted hominin land use. It is, therefore, critical to obtain well-constrained, independent data, both spatially and temporally, of the vegetation structure and type.

Fossil macroplants and phytoliths (Hay, 1976; Peters and Blumenshine, 1995) have been interpreted as representing a general marshland type of vegetation along the eastern palaeolake margin, an area of 10–20 km long by 1–10 km wide. On closer inspection, however, the macroplants have a more precise distribution. Here, for the first time, we use the macroplant and phytolith record to interpret the vegetation structure and composition of a portion of the eastern lake margin including localities FLK, VEK, HWK and MCK, over a distance of about 2 km, and during lowermost Bed II times, about 80 kyr.

During LMBII times (bracketed by Tuffs IF and IIA: Blumenshine et al., 2003: IF = 1.795 myr; Hay, 1976: IIA = 1.71 myr), the Olduvai Basin was a silica-rich area having been blanketed frequently by volcanic glass and lapilli diamicrites from the different volcanoes in the region at different times (Hay, 1976). Between the tuffs are layers of siliceous earthy claystones that are fluvial deposits, and

70

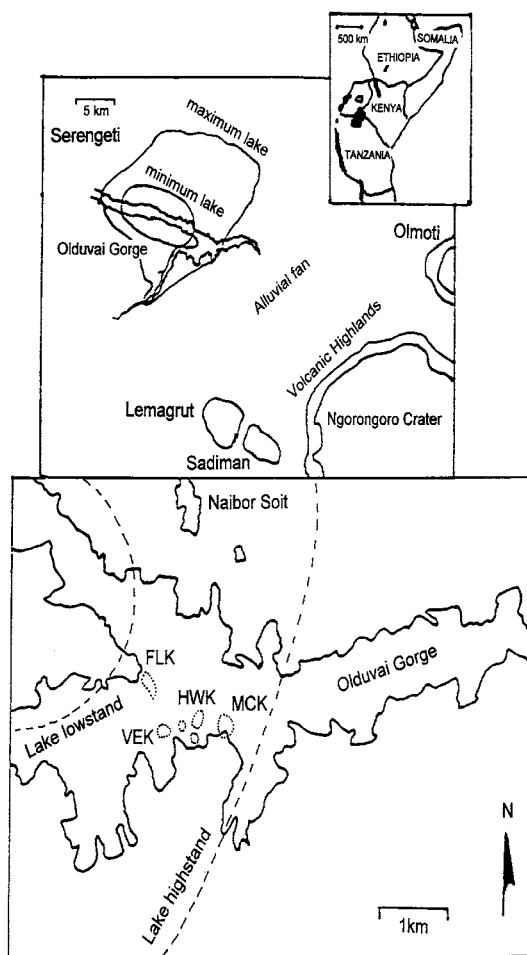


Fig. 1. Locality map showing the eastern palaeolake margin and localities in LMBII, which have phytoliths and macroplant fossils. Localities HWKE and HWKEE are part of the HWK complex and FLKN is part of the FLK complex, where E = east and N = north. Position: 3°0'S, 35°0'E (based on Hay, 1976; Peters and Blumenshine, 1995; Ebert unpublished map).



layers of smectitic (alumino-silicate) waxy claystones that are lacustrine sediments (Hay, 1976) deposited by the fluctuating palaeolake. Excavation and mapping through these layers in Olduvai Gorge has shown that macroplants and phytoliths are common in some of the fresher water sediments (Hay, 1976, pp. 22 and 24 respectively). Macroplants are rarely preserved in fossil hominin sites, yet Olduvai Gorge has an abundance of silicified plant fragments with well-preserved internal structure, first recognised by Charles Peters in 1997, that will potentially allow for the identification to generic level in some instances. Macroplants are particularly abundant in some of the stratigraphic levels of the eastern margin of the palaeolake; preliminary identifications of these plants suggested a wetland environment (Hay, 1976; Blumenshine and Peters, 1998). Silica phytoliths, noted by Hay (1976) and confirmed by Rosa M. Albert in preliminary studies in 2001–2002, have the potential to become a proxy for the study of the paleovegetation in Olduvai Gorge.

Phytoliths have been widely used for paleoecological reconstruction during the last 20 years (Wilding and Dress, 1969; Carbone, 1977; Piperno, 1997; Carter and Lian, 2000; Smith and Anderson, 2001). Their durability and resistance to post-depositional processes (their chemical composition is the same as opal) and their morphological characteristics (which reproduce the cellular tissue of certain plants and plant parts), make phytoliths a suitable tool with which to study both archaeological and paleoanthropological sites. They have been used in archaeological contexts since the 1970s and have allowed the identification of not only human use of plants (Rosen and Weiner, 1994; Albert et al., 1999, 2000, 2003; Madella et al., 2002, 2005; Albert and Henry, 2005), but also the correlation of the plants' presence (natural accumulation rather than anthropogenic) to the paleoenvironment of certain areas (Runge, 1999; Mercader et al., 2000; Albert and Henry, 2005). In Africa there have been several attempts to identify and reconstruct the paleovegetation through phytolith analyses on deposits of Paleolithic age (Alexandre et al., 1997; Barboni et al., 1999; Runge, 1999; Mercader et al., 2000; Mulder and Ellis, 2000). To date, however, there has not been an attempt to correlate the morphologic, morphometric and quantitative results of phytoliths from modern plants to those extracted from early hominin-bearing sediments within a well-constrained stratigraphical framework.

## 2. Materials and methods

Because phytoliths can vary greatly morphologically and quantitatively, depending not only on the type of plants but also on the part of the plant in which they have formed (Albert et al., 1999, 2000, 2003; Albert and Weiner, 2001), each plant selected for study was later separated, when possible, into the component parts, i.e. leaves, inflorescences, seeds, pods, bark and roots, before analysis.

In order to assess the usefulness of macroplants and phytoliths for reconstructing the palaeoenvironment, we have developed the following research design. Firstly, we collected modern plants (and their soils) for anatomical study and phytolith analysis. Secondly, we collected fossil macroplants from specific stratigraphic levels in specific localities and used our reference material and other published material to interpret the fossils. Thirdly, we collected fossil soils for phytolith analysis. Finally, the results of the macroplant and phytolith analyses were compared for each level and locality (modern soils were collected for later analysis; Albert et al., 2006).

The study we present here is focused on the macroplant fossil remains and phytoliths identified in samples collected from the eastern paleolake margin, in LMBII (Fig. 1). If the approach is found to be informative it can be extended to include other areas, such as the western margin, and other stratigraphic levels above or below LMBII.

### 2.1. Selection of modern reference samples

Two criteria have been used to select the samples for the modern plant and phytolith reference collection. Firstly, based on preliminary identifications of the macroplant fossils and, secondly, assuming that the fossil vegetation bore some physiognomic and taxonomic resemblance to the large scale regional vegetation in analogous ecosystems, collections of modern plants and soils were made from a number of sites in eastern and southern Africa. The fossil plants were predominantly fragments of round grass culms, triangular and round sedge culms (recognised by Charles Peters) and small branches and stem bases of dicotyledons and possible palm roots. Wetlands and saline lakes sampled for vegetation in the area of Olduvai by the authors and Charles Peters, were the Ol'Balbal Depression, Lake Manyara, Lake Masek, Lake Ndutu, Lake Jipe, Ngorongoro Crater (Tanzania). In southern Africa Marion Bamford and Charles Peters additionally sampled the permanent and seasonal freshwater wetlands of Seekoeivlei, Nylsvley, Mkuze and the Okavango Delta.

### 2.2. Preparation of modern plants for anatomical studies

Only a few samples have been sectioned so far because large collections of dicotyledonous and monocotyledonous plants have already been prepared, described and published (Metcalf and Chalk, 1950; Metcalf, 1971). Soft tissues such as those of the sedges and grasses were first dehydrated in an alcohol series, embedded in paraffin wax, sections cut on the rotary microtome, mounted on microscope slides, stained and studied (Johansen, 1940). Since there are many different sedges in East Africa (Haines and Lye, 1983), the triangular culmed sedges have been targeted to confirm identifications.

### 2.3. Preparation of fossil macroplants

A number of silicified plant fragments were selected to represent a variety of external morphologies such as round

culms, triangular culms, stem bases and woody branches. Specimens were embedded in resin, cut, polished and mounted on petrographic slides. The rest of the block was cut off and the remaining part ground and polished to a final thickness of about 40 µm. If the specimen was large enough, sections were made in all three planes: transverse, radial longitudinal and tangential longitudinal. Using a Zeiss Axiophot petrographic microscope, the slides were studied, measured and photographed. Preliminary identifications were made by comparing the anatomical features with descriptions and illustrations in the literature (Metcalfe (1971) for the grasses and sedges; Ilic (1987) and Wheeler et al. (1986) for the woods). Wood identifications were not possible because of the apparent juvenile features of the small diameter stems; identification keys are based on mature wood of branches at least 8 cm in diameter. Detailed descriptions and identifications of the macroplants are beyond the scope of this paper and will be published elsewhere.

#### 2.4. Preparation of modern plants for phytolith analysis

The study of the modern plant reference collection was carried out in order to understand the taxonomic significance of different phytolith morphologies and their absolute amounts in different plant taxa from the Olduvai Gorge area. This collection focused on sedges, grasses, palms, herbaceous and woody dicotyledons.

The methods used for the extraction of phytoliths from the modern plants follows those described in Albert and Weiner (2001). Washed and air dried aliquots were weighed and burned in a muffle furnace at 500 °C for 4 h. The ash was treated with an equivolume solution of 3 N HCl and 3 N HNO<sub>3</sub> for 30 min at 100 °C, to leave only the siliceous minerals, where phytoliths are included. The inorganic acid insoluble fraction (AIF) was centrifuged, re-suspended in deionized water and centrifuged again. The supernatant was discarded and the washing was repeated three times. When necessary, the AIF was re-ashed at 500° for 90 min and then weighed to an accuracy of 0.1 mg.

#### 2.5. Preparation of fossil soils for phytolith analysis

The method used for the paleoanthropological soil samples is similar to that described in a study of Tabun cave (Albert et al., 1999). A weighed aliquot of about 1 g of air-dried sediment was treated with 10 ml of an equivolume solution of 3 N HCl and 3 N HNO<sub>3</sub> for 30 min and then centrifuged at 3000 r.p.m. for 2 min to eliminate the carbonates and phosphates present in the soils. After washing the pellet with water, the organic material was oxidized with 10 ml of 30% hydrogen peroxide at 70°C. The sample was dried and the remaining sediment was weighed. This is referred to as the inorganic AIF.

The mineral components of the AIF were then separated according to their densities in order to concentrate the phytoliths by adding 5 ml of sodium polytungstate solution

[Na<sub>6</sub>(H<sub>2</sub>W<sub>12</sub>O<sub>40</sub>) · H<sub>2</sub>O] of 2.4 g/ml density. The suspension was then centrifuged at 3000 r.p.m. for 5 min and the supernatant was transferred to another centrifuge tube, 1.0 ml of deionized water was added and the tube was vortexed and again centrifuged as above. This cycle was repeated until no visible mineral particles remained in the supernatant. The heavy liquid was then diluted by filling the centrifuge tube with deionized water, to ensure that even the lightest minerals were recovered.

#### 2.6. Preparation of microscope slides for phytolith description

The preparation of the slides for examination under an optical microscope (Olympus BX41) followed the same methods for both the modern plant reference collection and the paleoanthropological samples. Slides were prepared by weighing approximately 1 mg of sample, with an accuracy of 0.1 mg, onto a microscope slide. The aerial coverage of the sample on the slide was estimated by counting the total number of fields containing sample grains. If possible, a minimum of 200 phytoliths with recognizable morphologies was counted. Siliceous fragments were not counted. According to previous results (Albert and Weiner, 2001), the identification of only 50 phytoliths with recognizable morphologies gives an error margin in the interpretation of the results of 40%, whereas with the identification of 200 phytoliths the error margin decreases to 24%.

#### 2.7. Description and identification of phytoliths

The morphological identification of the phytoliths was based on standard literature (Twiss et al., 1969; Geis, 1983; Brown, 1984; Piperno, 1988; Bozarth, 1992; Mulholland and Rapp, 1992; Ollendorf, 1992). The combination of morphological identification of phytoliths in relation to their abundance in different plants and plant parts was based on previous quantitative and morphological studies of modern plants (Albert, 2000; Albert et al., 2000, 2003; Albert and Weiner, 2001) The terms used to describe the phytoliths followed the system proposed by Albert (2000), which follows, wherever possible, the anatomical terminology of the cell in which they were formed. When this was not possible, terms describing the geometrical characteristics of the phytoliths were used. The new phytolith terminological code has also been checked to homogenize some of the terminologies used (Madella et al., 2005), but the latter is work in progress.

Additionally, infrared spectra of paleoanthropological soils were obtained, using Fourier Transform Infrared Spectrometry (FTIR) analysis. The spectrometer used was a Jasco 680 Plus, with the software Spectra Manager, by one of us (DC). Samples were dried out under a hot lamp for 12 h; then approximately 1 mg of initial sample without treatment was added to about 50 mg of KBr to make a pellet. The spectrometer was calibrated twice and blank

samples of known composition were also used as a check. The spectra were collected at  $4\text{ cm}^{-1}$  resolution. The FTIR analysis provides information on the nature of the minerals that constitute the bulk of the sample (Weiner and Goldberg, 1990). This method complements the identification of the minerals seen under the petrographic optical microscope, which provides information on mineral grain morphology, color and refractive index.

### 3. Results

#### 3.1. Modern plant phytolith analysis

Our results on the phytolith production show that the abundance of phytoliths differs depending on the group of plants (grasses, sedges, palms, dicotyledons) and parts of plants (stems, leaves, inflorescences, wood/bark). The grasses analyzed here produced between 70 and 180 million phytoliths per gram of AIF (Table 1). Sedges also produce a significant number of phytoliths, although fewer than grasses. This production varies depending on the type of sedge and the plant part. The family that produced the most phytoliths was the Arecaceae (palms; tree-like

monocots) represented here by *Phoenix reclinata* and *Hyphaene petersiana*. *P. reclinata*, in particular, produced over 350 million phytoliths in the flowers alone, and 125–170 million phytoliths in the rest of the plant parts. Another monocot, the cattail or bulrush, *Typha*, produced in general a small and non-morphologically characteristic number of phytoliths (Table 1).

Amongst the dicotyledonous plants, phytoliths are common in the leaves of trees, especially in *Acacia tortilis* and *Balanites aegyptiaca*. In this study, the leaves of *A. tortilis* produced around 18 million phytoliths per gram of AIF whereas the thorns and pods produced 4 million and 3 million phytolith per gram of AIF respectively (Table 1).

Morphologically, phytoliths are distinct for each group of plants. Grasses are represented mostly by short cells of the C3 type (Fig. 2a) in *Sporobolus consimilis* and *Sporobolus spicatus* (72 and 81% respectively) and in lesser amounts in *Cynodon dactylon* (36%; Fig. 3). Short cells are associated with long cell cylindroids with psilate or scabrate margins, and parallelepiped elongates (mainly in *C. dactylon*). The presence of multicellular structures from the inflorescences of grasses was also observed (Fig. 2b).

Table 1

Modern plant reference collection: taxa, plant parts, %AIF, number of phytoliths per 1 g inorganic acid insoluble fraction (AIF)

Name of plants	Place of collection	Habit	Part of plants	No. of phytoliths per gram of AIF
<i>Acacia tortilis</i>	Ol'Balbal lake margin	Tree	Pods	3 000 000
	Ol'Balbal lake margin	Tree	Thorns	4 000 000
	Ol'Balbal lake margin	Tree	Leaves	18 000 000
<i>Acacia xanthophloea</i>	Ol'Balbal lake margin	Tree	Leaves	6 000 000
<i>Achyranthes spicata</i>	Ol'Balbal depression	Herb	Leaves	2 000 000
<i>Balanites aegyptiaca</i>	Ol'Balbal depression	Tree	Leaves	12 000 000
<i>Cynodon dactylon</i>	Ol'Balbal depression	Grass	Whole plant	75 000 000
<i>Cyperus dives</i>	Ol'Balbal depression	Large sedge	Leaves	31 000 000
	Ol'Balbal depression	Large sedge	Stem	38 000 000
<i>Cyperus immensus</i>	Ol'Balbal depression	Large sedge	Leaves	23 000 000
	Ol'Balbal depression	Large sedge	Stem	37 000 000
<i>Cyperus laevigatus</i>	Lake Masek	Medium sedge	Upper part of leaves	50 000 000
	Lake Masek	Medium sedge	Whole plant	18 000 000
<i>Cyperus papyrus</i>	Jipe lake	Large sedge	Flowers	16 000 000
	Jipe lake	Large sedge	Stem	9 000 000
<i>Fuirena</i> sp.	Ol'Balbal depression	Medium sedge	Leaves	40 000 000
			Stem	18 000 000
<i>Hyphaene petersiana</i>	Lake Manyara	Palm	Leaves	46 000 000
			Flowers	147 000 000
			Dry rachis	47 000 000
			Seeds	147 000 000
<i>Kyllinga</i> sp.	W. Leakey camp	Small sedge	Whole plant	12 000 000
<i>Phoenix reclinata</i>	Jipe lake	Palm	Leaves	131 000 000
			Flowers	359 000 000
			Dry rachis	167 000 000
			Roots	125 000 000
<i>Sporobolus consimilis</i>	Lake Masek	Grass	Leaves	73 000 000
<i>Sporobolus spicatus</i>	Ol'Balbal depression	Grass	Whole plant	178 000 000
<i>Typha</i> sp.	Ol'Balbal depression	Reed	Fresh leaves	100 000
			Dried leaves	2 000 000
			Flowers	1 000 000

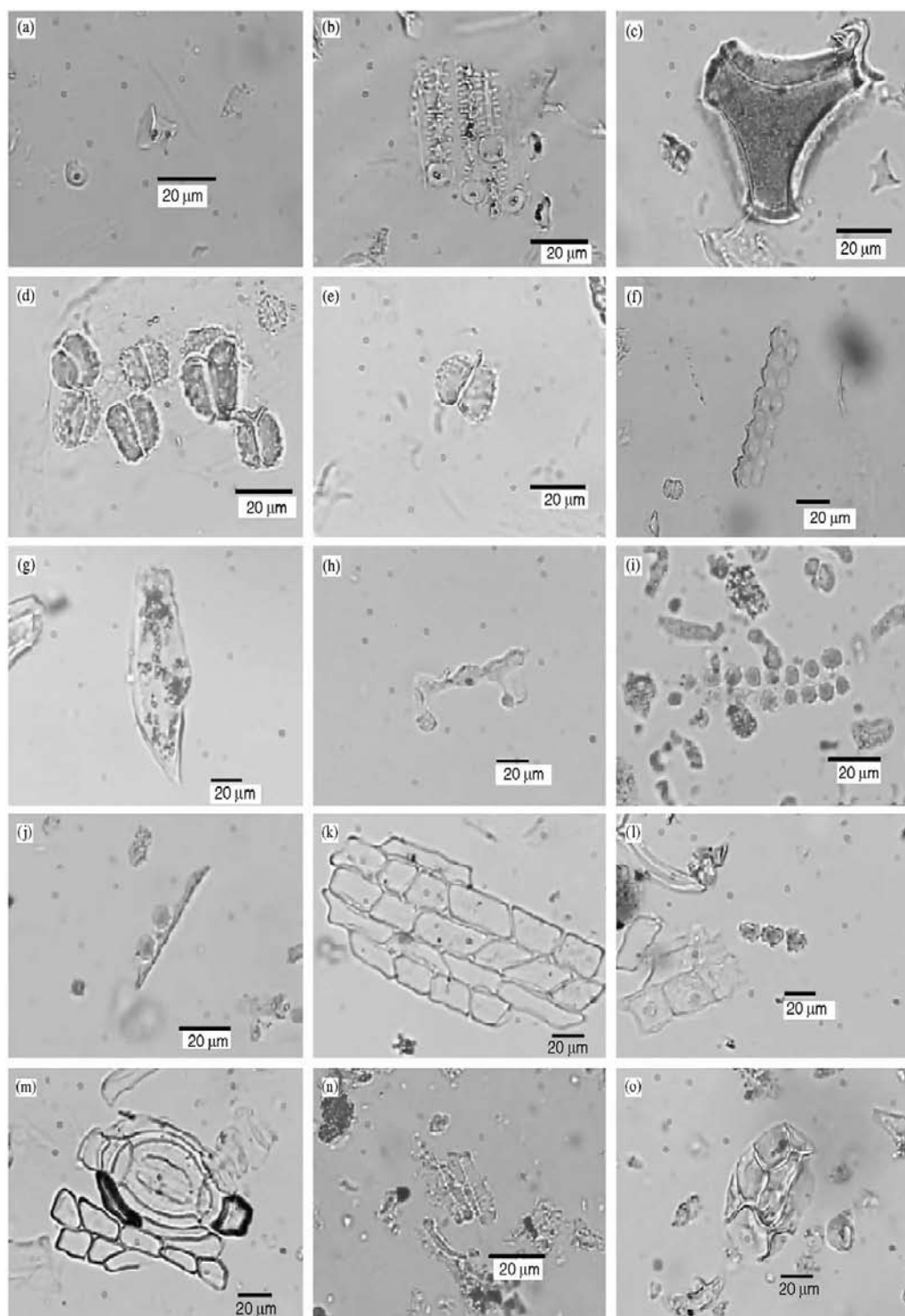


Fig. 2. Photomicrographs of phytoliths from the modern reference collection. Photographs at 400 × magnification, light microscope. (a) Short cells from the leaves of the grass *Sporobolus consimilis*, (b) multicellular structure with short cells from the flowers of *Sporobolus consimilis*, (c) bulliform silicified cell from the leaves of *Sporobolus consimilis*, (d) hemispherical verrucate forms (stomata cell?) identified in the leaves of *Fuirena* sp., (e) single hemispherical verrucate form from *Fuirena* sp., (f) multicellular structure of hat-shaped phytoliths recovered from the leaves of *Fuirena* sp., (g) awn hair from the flower of *Cyperus papyrus*, (h) cylindroid bulbous morphology from the culm of *Cyperus papyrus*, (i) spheroid echinate morphologies from the leaves of *Phoenix reclinata*, (j) spheroid echinate morphologies attached to parallelipiped elongate with facetate margins from the leaves of *Phoenix reclinata*, (k) multicellular structure with parallelipipids thin psilate margin from the leaves of *Hyphaene petersiana*, (l) spheroid echinate morphologies from the leaves of *Hyphaene petersiana*, (m) multicellular structure with parallelipiped thin psilate morphologies associated with stomata cells silicified identified in the leaves of *Hyphaene petersiana*, (n) tracheary elements from the leaves of *Acacia tortilis*, (o) epidermal appendage hair base with hair attached from the leaves of *Acacia xanthophloea*.

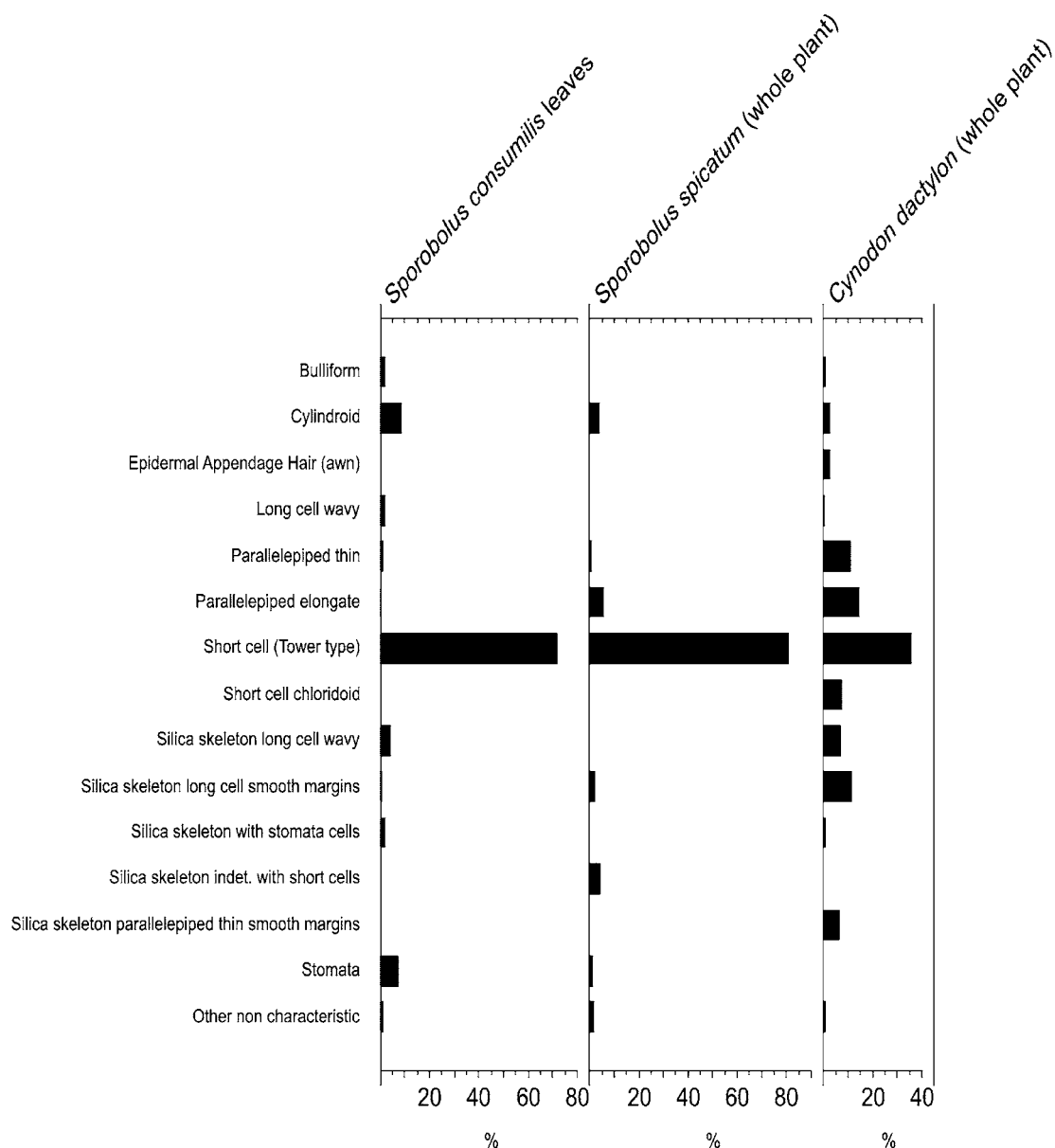


Fig. 3. Relative abundance of the different phytolith morphologies in some of the modern grasses, *Sporobolus consimilis*, *Sporobolus spicatus* and *Cynodon dactylon*.

Stomata cells were noted in low numbers (7%) in *S. consimilis*, even lower numbers in *S. spicatus* (1%) and were absent from *C. dactylon*. Bulliform cells were noted in *S. consimilis* and *C. dactylon*, but in low amounts (<2%) (Fig. 2c). The most interesting observation from this study of grasses was that *C. dactylon* and *Sporobolus* spp., all C4 grasses, contained more short cells characteristic of C3 grasses in the preparation (Fig. 3).

The phytolith morphological results of sedges are shown in Fig. 4. From the leaves of *Fuirena* sp., there is an important percentage of the hemispherical verrucate forms (34%) appearing either singly or in groups resembling stomata cells (Fig. 2d and e). These morphologies seem to be characteristic of this type of sedge, and have not been

observed or published in any other sedge from this or other reference collection studies (Ollendorf et al., 1987; Ollendorf, 1992; Carnelli et al., 2004). These morphologies are also accompanied by spheroid morphologies with a verrucate surface, but in lower numbers (9%). Hat-shaped phytoliths (Fig. 2f) were common and abundant both in *Fuirena* sp. and the other sedges analyzed (Fig. 4). In the flowers of *Cyperus papyrus* hairs with recognizable morphologies were identified (20%) (Fig. 2g), yet bulbous morphologies were particularly common in *C. papyrus* culms (Fig. 2h).

Palms were dominated, as expected, by spheroid echinate morphologies occurring in almost all of the plant parts of both species analyzed (Fig. 5). There were, however,

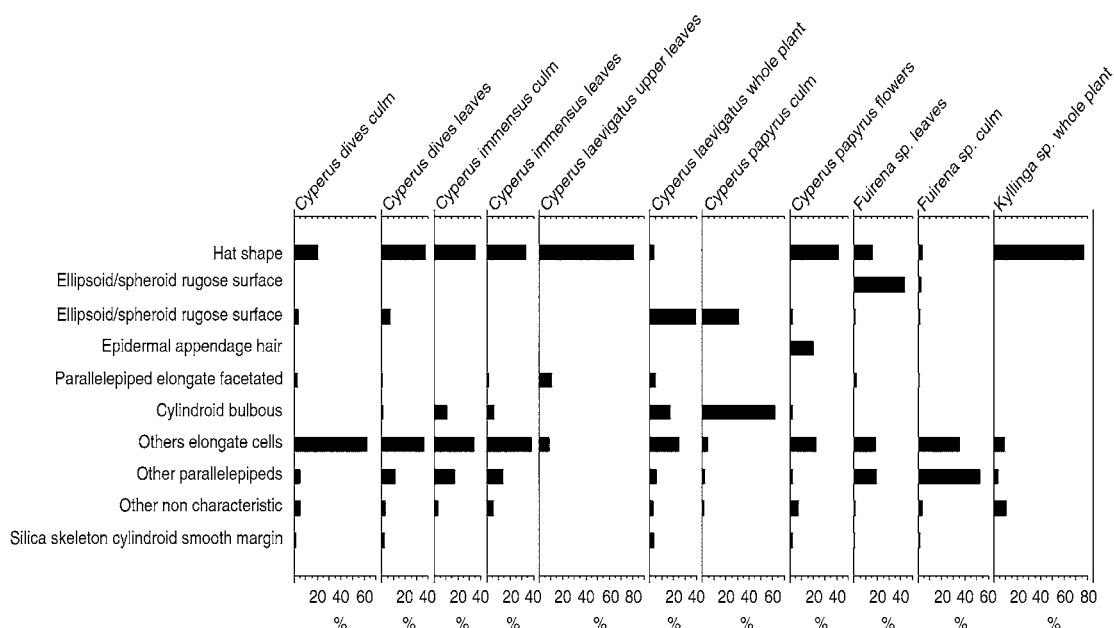


Fig. 4. Relative abundance of the different phytolith morphologies in the different parts of some modern sedges, *Cyperus dives*, *Cyperus immensus*, *Cyperus laevigatus*, *Cyperus papyrus*, *Fuirena* sp. and *Kyllinga* sp.

76

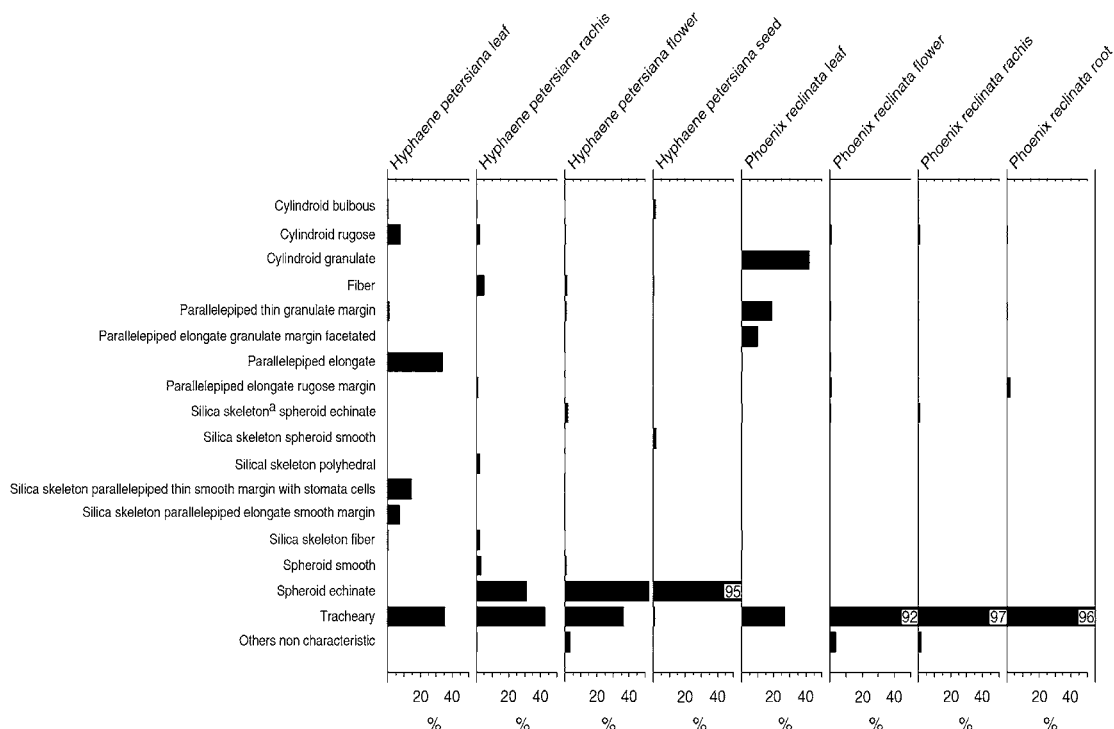


Fig. 5. Relative abundance of different phytolith morphologies in different parts of the palms *Hyphaene petersiana* and *Phoenix reclinata*.

some differences. All morphologies from the leaves of *P. reclinata* were typified by elongate forms with a verrucate surface and spheroid forms with an echinate surface (Fig. 2i and j). The rest of the plant parts from *P. reclinata* were dominated almost exclusively by spheroid

echinate morphologies. The leaves of *H. petersiana* were characterized by elongated and short parallelepiped forms comprising over 60% of all phytoliths, associated with spheroid echinate forms (35%; Fig. 2k and l). Stomata cells were also recognized in this sample and usually as a part

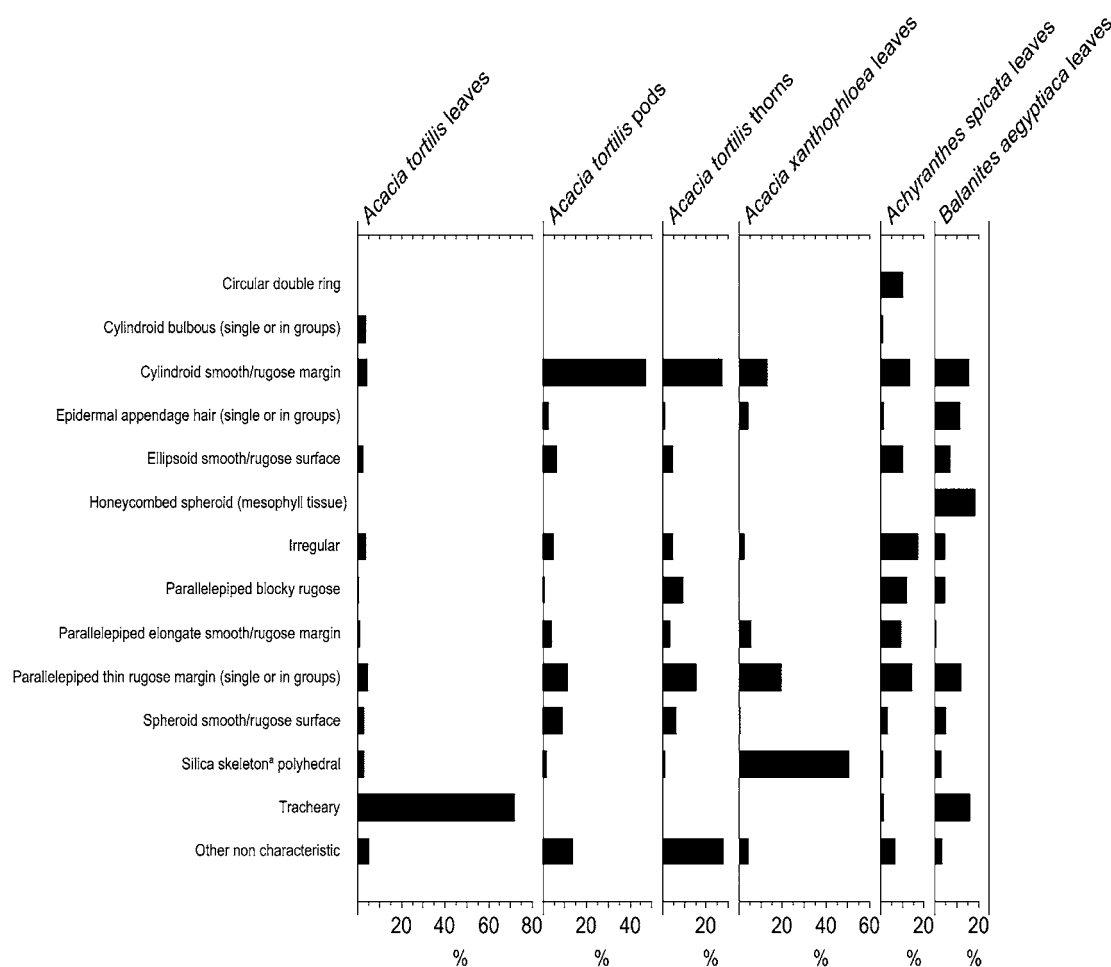


Fig. 6. Relative abundance of different phytolith morphologies in the dicotyledons *Acacia tortilis*, *Acacia xanthophloea*, *Achyranthes spicata* and *Balanites aegyptiaca*.

of multicellular structures with parallelepiped elongate morphologies (Fig. 2m). This study showed that in palm seeds the spheroid morphologies were present not with echinate but with psilate margins. Echinate morphologies are practically non-existent. Psilate morphologies were also noted but in association with echinate morphologies in the rachis and the flowers (Fig. 5).

Dicotyledonous plant phytoliths are shown in Fig. 6. *A. tortilis* leaves were represented mostly by tracheary elements (74%) (Fig. 2n). Polyhedral multicellular structures and hair bases were common in the leaves of *Acacia xanthophloea* (Fig. 2o). These morphologies were commonly found silicified in most dicotyledonous plants leaves and therefore their designation to different types of plants from the area will need a more refined morphometric study of phytoliths. Nevertheless, it is interesting to note that there is some differential silicification for both types of acacias. In *A. xanthophloea*, there is also a relatively significant number of cylindroid rugose morphotypes in the leaves that could correspond to tracheary elements

undergoing dissolution processes, whereas in *A. tortilis* this morphology is much less common in the leaves but is abundant in the pods and thorns. *Achyranthes spicata* leaves, which have an elevated estimated amount of phytoliths per gram of AIF, showed a variety of different morphologies where discoidal and irregular morphologies dominate the phytolith record. Cylindroid rugose morphologies that could correspond to tracheary elements were noted also in noticeable numbers, as well as parallelepipeds and ellipsoid morphologies. With the exception of the circular morphologies, which can be diagnostic of this specific plant, other morphologies identified do not present characteristic traits because they can be found in many other dicotyledonous plants. Specific to *B. aegyptiaca* leaves are the honeycombed assemblages of phytoliths, which are present as more than 18% of the total phytolith record. These morphologies, which represent the mesophyll tissue of dicotyledonous-leaf plants, were not found to be silicified in the other plants analyzed, suggesting a deeper silicification process for this plant. Cylindroids,

parallelepipeds and spheroids with rugose surface morphologies were the most common types identified in the thorns and pods of *A. tortilis* (Fig. 6).

In summary, our results show that morphologically some phytoliths are specific to certain groups (parallelepiped elongate forms to monocotyledonous plants, tracheary elements in dicotyledonous plants, etc.). There is a preference for the silicification of certain cells depending on the type of the plant (i.e. tracheary elements in *A. tortilis* and polyhedral forms in *A. xanthophloea*). The reason for this “selection” needs to be further explored. It is possible to differentiate certain sedges and their parts, for example *Fuirena* sp. leaves, by the presence of hemispherical verrucate morphologies. Diagnostic hairs were noted also in *C. papyrus*. The great abundance of verrucate elongate morphologies in association with spheroid echinate morphologies is characteristic of the leaves of *P. reclinata*.

### 3.2. Phytoliths from palaeoanthropological sediments of the Olduvai Gorge

In order to test the usefulness of this method and approach, we have selected fossil samples from LMBII in those localities where phytoliths and macroplant fossils occur together in this stratigraphic interval. Table 2 lists only the fossil samples analyzed that gave a minimum number of phytoliths with characteristic morphologies to obtain a reliable interpretation of the results, as well as the main mineralogical and quantitative results obtained from their study. The samples with more than 200 identifiable phytoliths are more reliable than those close to 50.

The FTIR analysis showed that there was very little variation in the mineralogy of the fossil sediments, the main minerals being alkaline feldspar or zeolite group minerals, probably both. Structural water from the zeolites is shown as water bending peaks in all samples. No evidence of clay is shown by the FTIR but XRD showed a small amount. According to Hay (1976), zeolites are the hydrated aluminosilicates with a framework structure enclosing pores and water molecules. Two samples have a significant content of calcite (with three peaks). There is, however, no clear relationship between phytolith content and mineral composition of the samples.

The AIF percentages vary depending on the different sampling localities as well as the amount of estimated phytoliths per gram of AIF. Most of the phytoliths showed strong signs of chemical dissolution, but some are well enough preserved to attempt an interpretation of the plants that were present in the past (Table 2).

### 3.3. HWKEE and HWKE samples

In sample 1a from Trench 107, (HWKEE) below a calcareous nodular layer, only 10 phytoliths were counted. In samples 2a from the same trench (waxy claystone sediment 42cm above Tuff IF and above the same

Table 2  
 Fossil phytoliths from LMBII from the different localities, % AIF, number of phytoliths per 1 g AIF, FTIR, and comparison of phytolith and macroplant data from the fossil samples

Locality and sample no.	Description	FTIR	% AIF	No. of phyt 1 gram of AIF	No. of phyt identified	Phytolith interpretation	Macroplant interpretation
HWKEE Tr-107.1a	Waxy claystone below calcareous nodular horizon	None		9000	10	Not interpreted	Vertical and fine roots
HWKEE Tr-107.2a	Waxy claystone above concretion (palaeolake margin)	Alkali feldspar, zeolite mineral group, low calcite, peak 1296 is O-H not identified	75.0	10 500 000	1458	Palms 80%, grasses	Monocots, sedges, grasses, dicots
HWKEE Tr-107.4a	Earthy claystone (palaeolake margin)	Alkali feldspar, zeolite mineral group, low calcite	74.9	6 000 000	1015	Palms.48%, grass 38%, dicot w/b 12%	None
HWKE Tr-11.5.2/02	Waxy claystone above Tuff IF (palaeolake margin)	Alkali feldspar, zeolite mineral group, dolomite low	62.8	400 000	108	Dicots w/b, sedge	Roots
FLKN Tr-116.38/02	Waxy earthy claystone, vertical roots top IF (Lake margin)	Alkali feldspar, zeolite mineral group, low calcite	68.3	300 000	64	Monocots, dicots w/b, grass	Roots
VEK Tr-111.25/02	Earthy claystone tongue (Maximum transgression)	None	71.6	400 000	88	Dicot w/b, monocots, grasses, palms, sedges	Roots
VEK Tr-111.26/02	Waxy claystone parallel to earthy claystone (maximum transgression)	None	80.8	100 000	69	Grasses, dicots	Roots
VEK Tr-111.27/02	Earthy (maximum transgression)	None	80	2 000 000	363	Dicots w/b, monocots, sedges, palms	Roots
MCK Tr-50.11/02	Waxy brown claystone (Lake margin)	Alkali feldspar, zeolite mineral group, quartz shoulder low	69.7	400 000	63	Dicots w/b, monocots, sedges, grass	Tr-108: dicot stems, sedges



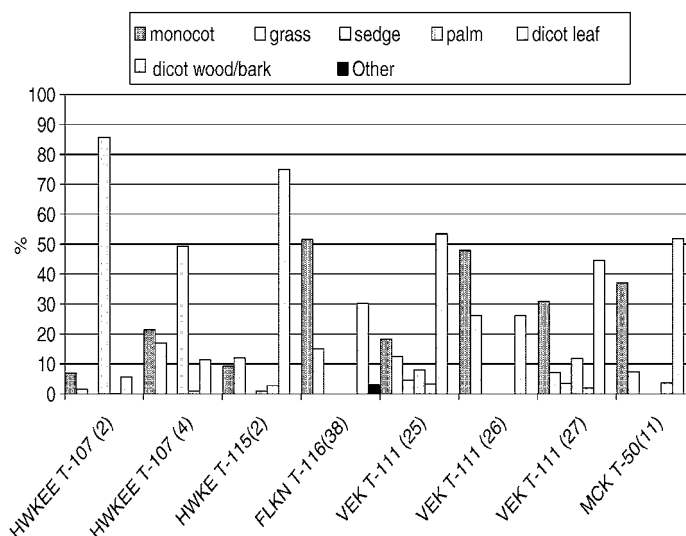


Fig. 7. Relative abundance of different phytolith morphologies in different palaeoanthropological sediments from Olduvai Gorge (Tanzania).

calcareous nodular layer) and 4a (earthy sediment 84 cm above Tuff IF and calcareous nodular layer), however, the estimated number of phytoliths per gram of AIF is the highest (Table 2). The phytoliths in the middle sample were represented by more than 85% of spheroid echinates (palms), with practically no other morphological types. In the upper sample, these morphologies represented 49% of the total count and were accompanied by grasses (38%) and dicotyledonous plants (12%; Fig. 7). Grasses were represented by bulliform cells (Fig. 8a and b), prickles and long cells with either wavy or dendritic margins (Fig. 8c), suggesting that the leaves and the inflorescences of these plants were present, although in much lower numbers. A few phytoliths characteristic of dicotyledonous leaves were also noted. The only indication of sedges is the spheroid morphologies with sculptured surfaces, in this case verrucate, characteristic of *Fuirena* sp. leaves. These spheroid morphologies were accompanied in significant numbers by hemispherical verrucate morphologies, either singly or in groups. The latter have not been identified in the fossil samples.

Samples from HWKE, Trench 115, the palaeolake margin (Fig. 1), showed a relatively significant number of phytoliths with characteristic morphologies. In this sample, dicotyledonous plants (Fig. 8d) dominate the phytolith record followed by grasses (Fig. 7 and 8e). Parallelepiped morphologies that most probably correspond to zeolite crystals of volcanic origin were abundant in this sample.

#### 3.4. VEK samples

From Trench 111 we find the same preservation as in Trench 107 in HWKEE (Fig. 7). Samples located below the calcareous nodular horizon contain very few phytoliths. Samples above this horizon have a much higher number of phytoliths, especially from the earthy claystone layers.

Overall, however, the numbers are lower and morphologically the taxonomic composition for this area is different from that of Tr-107. Above the nodular layer (sample 27), dicots (Fig. 8f) are more common than the various monocots, then monocots dominate (sample 26) and then dicots dominate again (sample 25) showing distinct shifts in vegetation over less than a metre of sediment and a fairly short time span. Palms phytoliths occurred in samples 27 and 25 but in low percentages (Fig. 8g).

#### 3.5. FLKN samples

From Trench 116 in the FLKN area, the samples do not contain many phytoliths. Only one sample (38) shows the presence of monocotyledonous plants (grasses) and dicotyledonous plants (Fig. 7). However, the number of phytoliths recovered was relatively low, and therefore caution should be taken when interpreting these results. Phytoliths from these samples showed strong signs of chemical dissolution.

#### 3.6. MCK samples

In the waxy brown claystone sample from Trench 50 dicotyledonous plants were dominant, followed to a lesser degree by grasses (Fig. 7). The other samples from MCK contained too few phytoliths for a reliable interpretation of the plants represented.

#### 3.7. Macroplant fossils from Olduvai Gorge

Some of the fossilized wood samples from HWKE have been described and identified as *Guibourtia coleosperma*, a medium-sized tree in the family Caesalpiniaceae, which today only grows farther south on deep well-drained soils (Bamford, 2005). Unfortunately, their exact provenience is

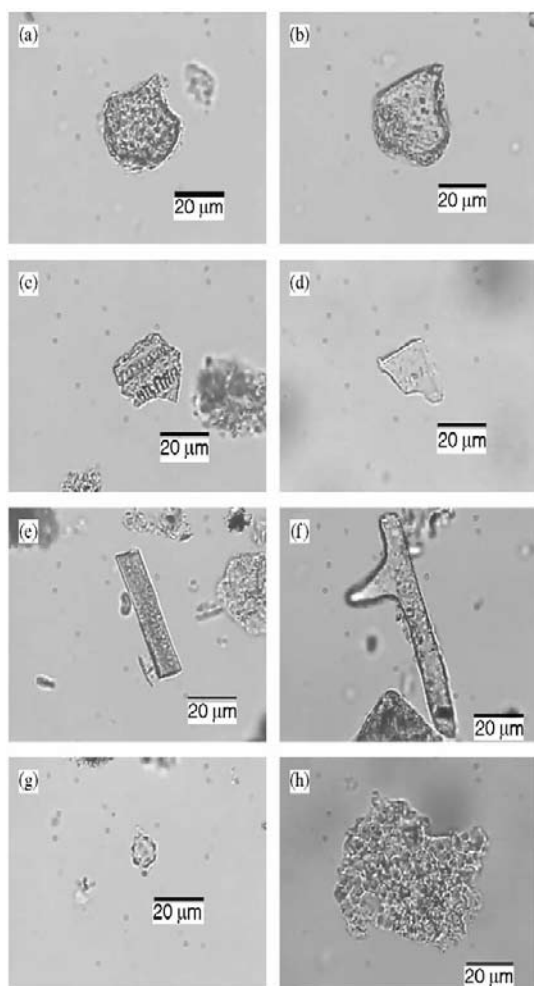


Fig. 8. Photomicrographs of fossil phytoliths recovered from palaeoanthropological samples. Photographs were taken at  $400\times$  magnification, light microscope. (a and b) Bulliform cells recovered from VEK locality, in Trench 111, (c) multicellular structure from the flowers of grass from VEK Trench 111, (d) irregular morphology from HWKE Trench 113, (e) parallelepiped elongate morphology from monocotyledonous plant recovered from VEK, Trench 111, (f) brachiform identified in VEK Trench 111, (g) spheroid echinate morphology from HWKEE T-107.2 sample, (h) silica volcanic fragment from HWKE.

in question as they could have been derived from either UMBI or LMBII. The wood was identified using detailed anatomical features and computer aided keys of Wheeler et al. (1986) and Ilic (1987) and then verified using the collection of modern wood slides in the xylarium of the Musée Royal de l'Afrique Centrale, Tervuren, Belgium.

In the eastern palaeolake margin, immediately above Tuff IF, which forms the base of LMBII, no macroplants were preserved, but at FLKN and VEK, about 20 cm above the tuff, there are silicified tubular fragments. These are not identifiable because they have no internal structure but, based on their external morphology (5 mm diameter, 2–25 mm long, smooth exterior with sporadic small protrusions), indicate that there was a vegetated surface.

Until they can be identified we have termed them “biogenic tubules” (Fig. 9a).

In the waxy/earthy claystone sediments at HWKE, plant fragments are more common 0.5–1.0 m above the tuff (470 pieces collected in a  $1\times 2$  m plot and all within the size range 2–7 mm diameter, 5–21 mm long). The macroplant remains include dicotyledonous stem bases, and triangular sedge culms (Fig. 9b) of at least three different types. These dicotyledonous stem bases or twigs have fairly well preserved internal structure but the juvenile wood is not characteristic of the mature wood, the part always collected and described for the large regional databases, so identifications are not possible at this stage. They are evidence, nonetheless, of woody vegetation (either shrubs or trees).

At MCK above the concretionary layer, there are dicotyledonous stem bases, triangular sedge culms and some other indeterminate plant fragments.

None of the samples sectioned so far is well enough preserved to allow any identification to the generic level, but it is possible to say that there are at least three different types of stem bases (two of the better preserved ones are described below) and at least five types of sedges (two of the better preserved ones described below).

### 3.8. Description of dicotyledonous stem bases

One of the silicified fragments (BP/16/1379), collected from MCK, Trench 108, Level 4 (about 1 m above tuff, in a bioturbated waxy-earthy claystone layer) is illustrated in Fig. 10a. The stem is round, 4.5 mm in diameter, with a very small central cortex. The external surface is very finely striated longitudinally. Study of the thin section under the microscope shows that growth rings are absent, and the wood is diffuse-porous. In transverse section, the vessels are oval in outline, solitary in arrangement with a density of 32 vessels per square mm. The average tangential diameter of the vessels is  $60\mu\text{m}$ . Rays are narrow, only 1 and 2–5 cells wide and are composed of procumbent and square to upright cells. The axial parenchyma is predominantly paratracheal and is arranged in 1–2 rows of cells around the vessels. There is possibly some apotracheal diffuse parenchyma present. Fibres are thick-walled (the specimen was too small to make longitudinal sections).

Another sample (BP/16/1387), from HWKE, Trench 104.5, Level 3 Spit 4 (approximately 1.5 m above tuff, in an earthy claystone horizon), shown in Fig. 10b, is a small, round stem, 5 mm in diameter, with a small parenchymatous central cortex. Growth rings are absent and the wood is diffuse porous. Vessels are round to oval in the transverse section. 50% of the vessels are solitary; the rest are arranged in low radial multiples of 2–5 cells. There are 30 vessels per square mm, and the mean vessel tangential diameter is  $85\mu\text{m}$ . Rays are 4–7 cells wide and there do not appear to be any uniseriate rays. Rays are heterocellular with procumbent and square to upright cells. Parenchyma is paratracheal only, vasicentric with mostly

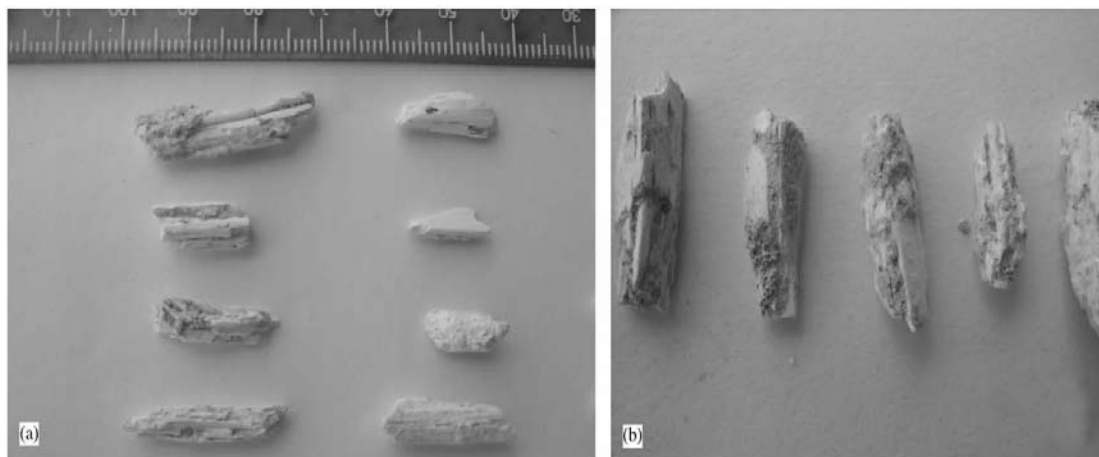


Fig. 9. (a) Biogenic tubules from VEK level 1, just above Tuff IF. (b) Triangular sedge culms from MCK.

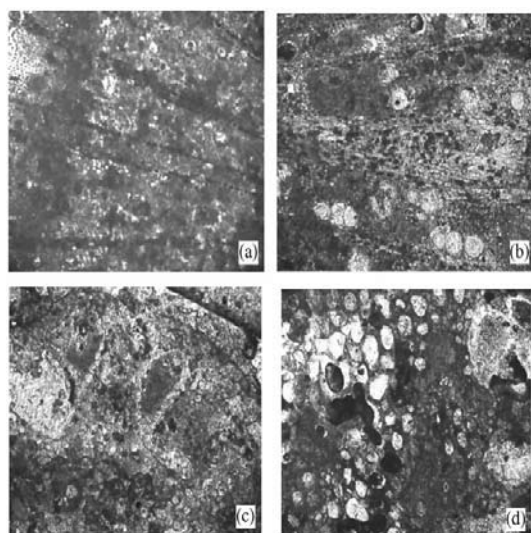


Fig. 10. Photomicrographs of thin sections of transverse sections of macroplant fossils from LMBII, Olduvai Gorge, Light microscope. Scales as indicated by scale bars. (a) BP/16/1379, dicotyledonous stem base; more or less horizontal lines are the rays and white holes the vessels. Centre of the stem is to the right. Scale bar = 1320  $\mu\text{m}$  or 1.32 mm. (b) BP/16/1387, dicotyledonous stem base, with vessels in radial groups of 2–3 pores. Centre of stem is towards the left. Scale bar = 450  $\mu\text{m}$  or 0.45 cm. (c) BP/16/1382, triangular sedge culm; teardrop shape is the outline of a vascular bundle with 2–3 rows of mesophyll cells. Scale bar = 360  $\mu\text{m}$ . (d) BP/16/1389, triangular sedge culm, with one vascular bundle to right and possible aerenchyma cells on the left (white). Scale bar = 360  $\mu\text{m}$ .

one, sometimes two, rows of cells around each vessel and also aliform in distribution, enclosing adjacent small vessels, but not confluent. Fibres are thick-walled.

### 3.9. Culms of triangular sedges

Sample BP/16/1382 from MCK, Trench 108, level 5 (97–105 cm above tuff in earthy claystone sediments) is shown in Fig. 10c.

All that remains of the sedge is a fragment of the triangular culm, each of the sides is 4.5 mm long and the fragment is 17 mm long. The culm is composed of central aerenchyma and around the periphery there are alternating vascular bundles with oval sections containing small aerenchyma cells or break-down areas. Peripheral vascular bundles have peripheral girdles of sclerenchyma. The central aerenchyma is composed of a network of large T-shaped cells, cell gaps and a few vascular bundles scattered in between. All vascular bundles are collateral with two layers of darkened cells surrounding the two metaxylem vessels, sclerenchyma cap and phloem region. Immediately outside the mestome sheath is a row of larger, pale parenchymatous mesophyll cells. Many sedges, including some species of *Cyperus*, have a similar internal anatomy so it is not possible to identify this sample to generic level other than to note that it has a typical C4 structure.

Another specimen, BP/16/1389, from HWKE, Trench 104.5, Level 3 spit 4 (1.5 m above tuff in an earthy claystone horizon) is shown in Fig. 10d. The culm fragment is triangular with all sides equal in length, 5 mm, and more or less straight. The piece is 21 mm long. Large vascular bundles are evenly distributed throughout the pith. Peripheral vascular bundles are immediately adjacent to the epidermal sclerenchyma band. Vascular bundles are 150  $\mu\text{m}$  in transverse diameter (oval outline). There are two rows of small dark mesotome sheath cells surrounding the two metaxylem vessels, sclerenchyma cap and phloem region. In contact with the mestome sheath is a row of larger, lighter mesophyll cells containing small dark bodies (chloroplasts?). This C4 anatomy is also common amongst the sedges.

### 4. Discussion

From the Olduvai Gorge sediments, it is evident that samples selected appear to have undergone some degree of diagenesis induced by post-depositional factors. These

include the formation of calcareous nodular layers that can induce an increase in pH and therefore the dissolution of phytoliths, noted both in HWKEE and VEK, and volcanic activity wherein the incorporation of siliceous volcanic minerals appears to have interfered with the identification of phytoliths (Fig. 8h). When phytoliths have been preserved in sufficiently high numbers for interpretation, they appear in relatively good condition, allowing for their morphological identification, in spite of the partial diagenesis. In general, the fossil phytoliths are sufficiently distinct morphologically to permit the identification of different groups of plants (monocotyledonous, dicotyledonous, etc.), plant families (palms, grasses, sedges, etc.), and plant parts (leaves and inflorescences of grasses; leaves of dicotyledonous plants, etc.) with the aid of the modern reference collection. The quality of preservation of phytoliths differs above and below calcareous nodular horizons, which are post-depositional features. The quality also seems to deteriorate in close proximity to tuffs. These taphonomic influences need further investigation so that better interpretations of the vegetation can be made.

Various macroplant fossils and phytoliths have been described from LMBII and although one might expect them to indicate the same vegetation type at any one particular time and locale, this is not always the case because of taphonomic biases. The fossil floras for each site are discussed below and summarized in Table 2.

Confining this study to the lowermost Bed II stratigraphic levels (1.795–1.71 myr), we consider the localities closest to the lake first (west to east, Fig. 1). At FLKN Trench 116 very few phytoliths are preserved yet they show a diversity of plants: monocots (meaning sedges, grasses and bulbs cannot be distinguished), wood/bark of dicots and grasses. The abundance of dissolved silica in this sample is from the volcanic siliceous minerals. The only possible macroplants preserved in the same horizon are white, silicified, vertical biogenic tubules, which could represent root casts or invertebrate tunnels, such as those produced by termites. Since they do not closely resemble monocot roots or stems, it is not possible to correlate them with the phytolith data from FLKN. Triangular culms of sedges have been recovered from other trenches in FLK. Although the low numbers of phytoliths and macroplant remains may indicate that the vegetation was sparse it could also be a result of poor conditions for preservation. Nonetheless, there is good evidence for the presence of sedges, grasses and dicots at FLKN during LMBII times, indicating marshland and grassland close to the palaeolake after the deposition of Tuff IF. The presence of trees cannot be confirmed because we are unable to distinguish, at this stage, between the wood/bark phytoliths of woody and herbaceous dicots. The rhizcretions in levels 1 and 2 above Tuff IF (Leakey, 1971; Hay, 1976) have a rough exterior and are larger and more robust than the biogenic tubules already described here. These will not be interpreted until more comparative studies have been done.

At VEK Trench 111, in LMBII, the biogenic tubules are more abundant than in FLK. Phytoliths are absent below the calcareous nodular layer but present above it, indicating the presence of monocots, some grasses and dicots. The samples also contained lots of volcanic siliceous minerals. Since the phytoliths do not show a high degree of dissolution we can assume that the conditions for preservation are good. Closer to Tuff IF the phytoliths are abundant but decrease in number going up the sequence (samples 27, 26, 25 respectively). The sediments (earthy claystone, waxy-earthy claystone, earthy claystone, respectively) indicate fluvial, lacustrine-fluvial and fluvial settings, in other words fluctuating lake levels, which may explain the apparent decrease in vegetation cover over the time period. Although more sampling is needed to check this hypothesis, it is important to note that phytoliths and macroplants do reflect vegetation changes. The macroplant record indicates the presence of sedges (very few) and non-determinate plant material. Corresponding with the sediment and environmental changes the phytoliths indicate a shift from dicot dominated to monocot dominated to a mixture of dicot and monocot vegetation and low numbers of palms.

At HWKE the samples are much more interesting. From Trench 115 in the waxy claystone the phytoliths indicate the presence of dicotyledonous plants and grasses, but there is also some degree of dissolution of the phytoliths. The macroplants are of dicotyledonous stems and sedges. Biogenic tubules are also present. The presence of dicotyledonous plants is evident from both types of fossils (phytoliths and macroplants) and the discrepancy between grasses and sedges can only be partially explained by the small sample size for the macroplants. Some of the tubular plant fragments not yet sectioned could well be grass culms. Sedge phytoliths are easily recognized based on the modern reference collection and also as triangular stems amongst the macroplant fossils. Trench 107, with more intensive sampling, contained no phytoliths immediately above Tuff IF, succeeded by a dominance of palms and then a mixture of palms, grasses and dicotyledonous plants. The macroplant record follows the same pattern with no plants immediately above Tuff IF, then an abundance of silicified pieces between 0.5 and 1 m above Tuff IF comprising mostly indeterminate pieces, 0.1% round stems and culms and only 0.06% triangular culms. No palms have yet been recognized in the macroplant record yet the phytolith record shows that they were common or dominant.

The only mineralogical difference between samples 1a and 2a from Trench 107 is the presence of a calcareous nodular layer in between these two samples. This layer seems to notably have affected the preservation of phytoliths; dissolution is extremely high before its formation (close to 90%) and much less after the layer was formed (12%). Thus, the absence of phytoliths in sample 1a could be a result of the absence of vegetation or due to the high dissolution rate associated with the formation of the

calcareous nodular layer. Calcareous nodular layers are formed by the accumulation of calcite and circulating water that could have notably increased the pH and therefore affect the preservation of phytoliths. After its formation, the preservation condition for phytoliths was good and they are recognized in abundance.

No macroplants have been studied from Trench 50 in MCK but the phytoliths show the presence of dicots, monocots sedges and grasses. From Trench 108 waxy claystones very few phytoliths were recovered, but these also indicated dicots and grasses. The macroplants indicated woody dicots and sedges (but in very low proportions) based only on external morphology. The trenches are some meters apart so it would be risky to make direct comparisons but if the sub-facet level/area is considered, the vegetation would have included shrubs (possibly trees), forbs, grasses and sedges.

It is clear from these comparisons that there is some degree of correlation between the macroplant and phytolith record (Table 2). There are several possible reasons for the lack of complete correlation. The time represented by any of the stratigraphic horizons is unknown, and although probably fairly short in geological terms ( $10^4$  years), it is sufficiently long for significant changes in vegetation to have occurred if the climatic conditions changed. Care was taken to sample phytoliths and macroplants from the same sites and levels to minimize this effect. Research is in progress on the geochronology and duration of time represented by the specific stratigraphic levels (Stanistreet, pers. comm. July 2005).

It would also be useful to be able to distinguish between woody and herbaceous dicots from the phytolith record as this is critical in reconstructing the palaeoenvironment. The “rugose” types described by Alexandre et al. (1997) from woody dicots have been found by Albert et al. (1999, 2000, 2003), Albert and Weiner (2001) and Albert (2000) to be variable in their degree of rugosity. They have found that older phytoliths buried in soils tend to be more rugose than the younger psilate equivalents. The modern reference collection will have to be extended in order to address this question. The phytoliths themselves vary in hardness and degree of silicification so their durability varies and the more delicate ones are likely to be under-represented in the fossil record. It should be kept in mind that some morphologies characteristic of sedges, such as hat-shape phytoliths are not commonly preserved in soils.

One important observation is the presence of C3-type phytoliths in C4-grasses. This phenomenon was already suggested by Barboni et al. (1999) and showed by T. Ball in his phytolith morphological catalogue. The implication from our results is that the interpretation of C3/C4 vegetation using grass phytoliths should be treated with caution and requires more detailed studies of reference material. Furthermore, the study of the same species of plants from other areas with different mineralogical and climatic conditions could produce interesting comparisons. The degree of silicification for grasses seems to be higher at

Olduvai than other regions such as the eastern Mediterranean.

Phytoliths are inorganic whereas plants are organic. Phytoliths are numerous, small and durable, being made of silica, and so are easily incorporated into the sediments with no chemical transformation required. In contrast, a sequence of events is required from the death of a plant, disintegration, burial and chemical alteration to produce a silicified fossil. Thus, there is a difference in time and conditions for the preservation of phytoliths and macroplants. Some samples showed a high degree of dissolution of the phytoliths, and this may be due to very alkaline conditions in the soil and/or the movement of water through the sediment associated with the formation of the calcareous nodular horizons.

There does not seem to be any correlation between the type of fossil sediment (from field observations and FTIR analysis) and the occurrence of phytoliths or macroplants (Table 2). Both main sediment types, earthy claystone and waxy claystones, can either be sterile or have abundant macro- or microplant remains. This is clearly indicative of the fact that neither do we understand the taphonomy of the plant remains nor the precise conditions during formation of these stratigraphic levels. FTIR analyses shows that although the colour and texture of the waxy and earthy claystones are distinct, mineralogically they are very similar (smectitic clays, Hay, 1996). Phytolith and macroplant concentrations also seem to be independent of the sediment type. More work needs to be carried out on fossil and modern soils to help understand the processes involved. The microenvironment in which the plants grew originally (sand, clay, seasonally wet, permanently wet, well drained, lacustrine, fluvial, for example) may also determine their chances of preservation, even though the whole basin appears to be a silica-rich environment. Nonetheless the plant record, especially both the combination of macroplants and phytoliths, can give some indication of the past vegetation. A better understanding of the taphonomy will only increase the usefulness.

#### 4.1. Comparison with fossil record

The pollen record for LMBII (Bonnefille, 1984) showed no palms but abundant grasses and sedges and a variety of dicots from just above Tuff IF at VEK and FLKN. These are areas which we found to be barren of phytoliths and macroplants. Grass, sedge and dicot pollen occurred higher up the sequence at VEK and much higher up at HWKEE but it is not possible to correlate the sampling horizons and compare results. Nonetheless the macroplant and phytolith record of autochthonous vegetation can complement the pollen record which is in part allochthonous.

Stable carbon isotope analysis of basal Bed II paleosol (Sikes, 1994) indicated a riparian forest to grassy woodland on the eastern palaeolake margin near HWK and FLK, over a square km. HWKE Level 1 is immediately above Tuff IF (p. 30, Sikes, 1994) and is a waxy claystone. This

level was found to be barren of macroplants and have very few phytoliths, in spite of the presence of alleged “rootmarkings” reported by Leakey (1971), Hay (1976) and Sikes (1994). The macroplant and phytolith record add to this reconstruction of riparian and grassy woodland by indicating the presence of sedges and also fine scale vegetation fluctuations over time.

From the vertebrate fossil record, there is very little evidence of animals immediately above Tuff IF, followed by the reappearance of some of the earlier carnivores, bovids, suids, elephantids and giraffids but not all of the Bed I taxa (Leakey, 1967, Table 3; Kappelman, 1984; Shipman and Harris, 1988; Peters et al., in prep.). This is work in progress by members of the OLAPP team. As described above, the macroplant and phytolith record is on a much finer temporal and spatial scale yet broad correlations are evident.

## 5. Conclusion

The macroplant fossils and phytoliths provide a precise record of the plants growing in specific areas at specific times, and this is complementary to the more general and broader scale vegetation reconstructions based on palynology, isotopes and fauna. Phytoliths are preserved in large numbers and can be confidently identified with the aid of modern reference collections. The internal anatomy of the plant fragments is most often preserved so they also have the potential to be identified. These remains are well provenanced, documenting components of the flora at specific places and time intervals. The modern reference collection for plants and phytoliths can be extended and assist in the identification of the indeterminate fossil forms. Once the taphonomic biases are known, and by using modern analogues, it will be possible to make well-informed reconstructions.

Using fossil material from LMBII in the eastern palaeolake margin of the Olduvai Basin, we can reconstruct the vegetation. Immediately after the deposition of Tuff IF, there was very little vegetation in the basin. Then palms grew, in one area at least, and sedges, grasses and dicotyledons became more widespread and varied in proportions and abundance over time as described above. Macroplants represent a small fragmented record. Phytoliths represent a larger proportion of the flora and different parts of plants from the macroplants. The comparisons made here show that there is some correlation between the macroplant and phytolith record and that this dual approach is complementary. Because phytoliths are already silicified, prior to death and burial, they record all the vegetation growing in one area. Volcanic material sometimes masks the phytoliths but does not destroy them. Dissolution of phytoliths is recognizable so can be taken into account but other factors need to be studied, such as the effect of calcareous layers and ground water movement. Macroplants, being mostly composed of relatively soft organic tissue, record only part of the vegetation but can be

identified to species level, thus complementing both the phytolith and pollen records. Vegetation reconstruction based on the fauna, can therefore be greatly refined spatially and temporally. This general picture can be refined with more research and applied to other strata. Further investigation of the biogenic tubules and their origin will further add to our understanding of the past ecosystem and early hominin land use.

## Acknowledgements

We would like to thank OLAPP team members for their field support and intellectual interaction and the NSF (SBR-0109027) for financial support. The Tanzanian Commission for Science and Technology (COSTECH), the Tanzanian Department of Antiquities and the Ngorongoro Conservation Area Authority are also thanked for allowing us to carry out the research. Marta Portillo of the University of Barcelona prepared the phytolith samples. The Ministerio de Ciencia y Tecnología (Spain) is acknowledged for financial support for equipment for RMA (Ref. BSO2002-12596-E). The Palaeoanthropological Scientific Trust (PAST) of South Africa is gratefully acknowledged for financial support to MKB for the field work and establishment of the modern plant database. Mr D. Mbenze prepared the thin sections at the Bernard Price Institute for Palaeontological Research.

## References

- Albert, R.M., 2000. Study of ash layers through phytolith analyses from the middle Palaeolithic levels of Kebara and Tabun Caves. Unpublished PhD Thesis, Universitat de Barcelona, Barcelona.
- Albert, R.M., Henry, D., 2005. Herding and agricultural activities at the early Neolithic site of Ayn Abū Nukhayla (Wadi Rum, Jordan). The results of phytolith and spherulite analyses. *Paléorient* 30 (2), 81–92.
- Albert, R.M., Weiner, S., 2001. Study of phytoliths in prehistoric ash layers using a quantitative approach. In: Meunier, J.D., Coline, F. (Eds.), *Phytoliths: Applications in Earth Sciences and Human History*. A.A. Balkema Publishers, Lisse, pp. 251–266.
- Albert, R.M., Tsatskin, A., Ronen, A., Lavi, O., Estroff, L., Lev-Yadum, S., Weiner, S., 1999. Mode of occupation of Tabun Cave, Mt Carmel, Israel during the Mousterian Period: a study of the sediments and phytoliths. *Journal of Archaeological Sciences* 26, 1249–1260.
- Albert, R.M., Weiner, S., Bar-Yosef, O., Meignen, L., 2000. Phytoliths in the Middle Palaeolithic deposits of Kebara Cave, Mt Carmel, Israel: study of the plant materials used for fuel and other purposes. *Journal of Archaeological Science* 27, 931–947.
- Albert, R.M., Bar-Yosef, O., Meignen, L., Weiner, S., 2003. Phytolith and mineralogical study of hearths from the Middle Paleolithic levels of Hayonim Cave (Galilee, Israel). *Journal of Archaeological Science* 30, 461–480.
- Albert, R.M., Bamford, M.K., Cabanes, D., 2006. Taphonomy of phytoliths and macroplants in different soils from Olduvai Gorge (Tanzania) and the application to Plio-Pleistocene palaeoanthropological samples. *Quaternary International*, this volume, doi:10.1016/j.quaint.2005.11.026.
- Alexandre, A., Meunier, A.-D., Lézine, A.-M., Vincens, A., Schwartz, D., 1997. Phytoliths: indicators of grassland dynamics during the late Holocene in intertropical Africa. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 136, 213–229.

- Bamford, M.K., 2005. Early Pleistocene fossil wood from Olduvai Gorge, Tanzania. *Quaternary International* 129, 15–22.
- Barboni, D., Bonnefille, R., Alexandre, A., Meunier, J.D., 1999. Phytoliths as palaeoenvironmental indicators, west side Middle Awash valley, Ethiopia. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 152, 87–100.
- Blumenschine, R.J., 1989. A landscape taphonomic model of the scale of prehistoric scavenging opportunities. *Journal of Human Evolution* 18, 345–371.
- Blumenschine, R.J., Masao, F.T., 1991. Living sites at Olduvai Gorge, Tanzania? Preliminary landscape archaeology results in the basal Bed II lake margin zone. *Journal of Human Evolution* 21, 451–462.
- Blumenschine, R.J., Peters, C.R., 1998. Archaeological predictions for hominid land use in the paleo-Olduvai Basin, Tanzania, during lowermost Bed II times. *Journal of Human Evolution* 34, 565–607.
- Blumenschine, R.J., Peters, C.R., Masao, F.S., Clarke, R.J., Deino, A.L., Hay, R.L., Swisher, C.C., Stanistreet, I.G., Ashley, G.M., McHenry, L.J., Sikes, N.E., van der Merwe, N.J., Tactikos, J.C., Cushing, A.E., Deocampo, D.M., Njau, J.K., Ebert, J.I., 2003. Late Pliocene Homo and hominid land use from western Olduvai Gorge, Tanzania. *Science* 299, 1217–1221.
- Bonnefille, R., 1984. Palynological research at Olduvai Gorge. *National Geographic Society Research Reports* 17, 227–243.
- Bozarth, S.R., 1992. Classification of opal phytoliths formed in selected dicotyledons native to the Great Plains. In: Rapp, Jr., G., Mulholland, S.C. (Eds.), *Phytolith Systematics. Emerging Issues, Advances in Archaeological and Museum Science*. Plenum Press, New York, pp. 193–214.
- Brown, D.A., 1984. Prospects and limits of a phytolith key for grasses in the central United States. *Journal of Archaeological Science* 11, 345–368.
- Carbone, V.A., 1977. Phytoliths as paleoecological indicators. *Annals of the New York Academy of Science* 288, 194–205.
- Carnelli, A.L., Theurillat, J.P., Madella, M., 2004. Phytolith types and type-frequencies in subalpine-alpine plant species of the European Alps. *Review of Palaeobotany and Palynology* 129, 39–65.
- Carter, J.A., Lian, O.B., 2000. Palaeoenvironmental reconstruction from the last interglacial using phytolith analysis, southeastern North Island, New Zealand. *Journal of Quaternary Science* 15, 733–743.
- Cerling, T.E., Hay, R.L., 1986. An isotopic study of paleosol carbonates from Olduvai Gorge. *Quaternary Research* 25, 63–78.
- Fernández-Jalvo, Y., Denys, C., Andrews, P., Williams, T., Dauphin, Y., Humphrey, L., 1998. Taphonomy and palaeoecology of Olduvai Bed-I (Pleistocene, Tanzania). *Journal of Human Evolution* 34, 137–172.
- Geis, J., 1983. Classification of phytoliths from angiosperm and coniferous trees: Paper presented at the Annual Meeting of the American Association for the Advancement of Science, Detroit.
- Haines, R.W., Lye, K.A., 1983. *The Sedges and Rushes of East Africa*. East African Natural History Society, Nairobi.
- Hay, R.L., 1976. *Geology of Olduvai Gorge*. University of California Press, Berkeley.
- Hay, R.L., 1996. Stratigraphy and lake-margin palaeoenvironments of lowermost Bed II in Olduvai Gorge. *Kaupia (Darmstadter Beiträge zur Naturgeschichte)* 6, 223–230.
- Hay, R.L., Reeder, R.J., 1978. Calcretes of Olduvai Gorge and the Ndolanya Beds of northern Tanzania. *Sedimentology* 25, 649–673.
- Ilic, J., 1987. The CSIRO family key for hardwood identification. Division of Chemical and Wood Technology. Technical Paper No. 8, Clayton, Australia, 177pp.
- Johansen, D.A., 1940. *Plant Microtechnique*. McGraw-Hill Book Company, Inc., New York 523pp.
- Kappelman, J., 1984. Plio-Pleistocene environments of Bed I and lower Bed II, Olduvai Gorge. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 48, 171–196.
- Kappelman, J., Plummer, T., Bishop, L., Duncan, A., Appleton, S., 1997. Bovids as indicators of Plio-Pleistocene palaeoenvironments in East Africa. *Journal of Human Evolution* 32, 229–256.
- Leakey, L.S.B., 1967. *Olduvai Gorge 1951–1961 Volume 1, A Preliminary Report on the Geology and Fauna*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Leakey, M.D., 1971. *Olduvai Gorge, Volume 3: Excavations in Beds I and II, 1960–1963*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Madella, M., Jones, M.K., Goldberg, P., Goren, Y., Hovers, E., 2002. The exploitation of plant resources by Neanderthals in Amud Cave (Israel): the evidence from phytolith studies. *Journal of Archaeological Science* 29, 703–719.
- Madella, M., Alexandre, A., Ball, T., 2005. International code for phytolith nomenclature 1.0. *Annals of Botany* 96, 253–260.
- Mercader, J., Runge, F., Vrydaghs, L., Doutrelepon, H., Corneile, E., Juan-Treserras, J., 2000. Phytoliths from archaeological sites in the tropical forest of Ituri, Democratic Republic of Congo. *Quaternary Research* 54, 102–112.
- Metcalfe, C.R. (Ed.), 1971. *Anatomy of the Monocotyledons, Volume 1: Graminae. Vol. 5: Cyperaceae*. The Clarendon Press, Oxford.
- Metcalfe, C.R., Chalk, L., 1950. *Anatomy of the Dicotyledons*. The Clarendon Press, Oxford 2 volumes.
- Mulder, C., Ellis, R.P., 2000. Ecological significance of South-West African grass leaf phytoliths: a climatic response of vegetation biomes to modern aridification trends. In: Jacobs, S.W.L., Everett, J. (Eds.), *Grasses: Systematics and Evolution. Proceedings of the Second International Conference on the Comparative Biology of the Monocotyledons (MONOCOTS II: Sydney)*. CSIRO, Melbourne, pp. 248–258.
- Mulholland, S.C., Rapp Jr., C., 1992. A morphological classification of grass silica-bodies. In: Rapp, Jr., G., Mulholland, S.C. (Eds.), *Phytolith Systematics. Emerging Issues, Advances in Archaeological and Museum Science*. Plenum Press, New York, pp. 65–89.
- Ollendorf, A.L., 1992. Towards a classification scheme of sedge (Cyperaceae) phytoliths. In: Rapp, Jr., G., Mulholland, S.C. (Eds.), *Phytolith Systematics. Emerging Issues, Advances in Archaeological and Museum Science*. Plenum Press, New York, pp. 91–111.
- Ollendorf, A.L., Mulholland, S.C., Rapp, G.J., 1987. Phytoliths from some Israeli sedges. *Israel Journal of Botany* 36, 125–132.
- Peters, C.R., Blumenschine, R.J., 1995. Landscape perspectives on possible land use patterns for Early Pleistocene hominids in the Olduvai Basin, Tanzania. *Journal of Human Evolution* 29, 321–362.
- Peters, C.R., Blumenschine, R.J., 1996. Landscape perspectives on possible land use patterns for Early Pleistocene hominids in the Olduvai Basin, Tanzania: Part II, expanding the landscape models. *Kaupia* 6, 175–221.
- Peters, C.R., Blumenschine, R.J., Masao, F., Albert, R.M., Andrews, P.J., Bamford, M.K., Bonnefille, R., Ebert, J., Hay, R.L., Njau, J., Stanistreet, I.G., Stolhoffen, H. (in prep.) Oldowan hominin occupation, abandonment and subsequent renewed use of the eastern Olduvai Basin (Tanzania), after the volcanic eruption of Mt. Olmoti ca. 1.8 Ma.
- Piperno, D.R., 1988. *Phytolith Analysis: An Archaeological and Geological Perspective*. Academic Press, San Diego.
- Piperno, D.R., 1997. Phytoliths and microscopic charcoal from Leg 155: a vegetational and fire history of the Amazon Basin during the last 75 Kyr. In: Flood, R.D., Piper, D.J.W., Klaus, A., Peterson, L.C. (Eds.), *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results, Vol. 155*.
- Plummer, T.W., Bishop, L.C., 1994. Hominid paleoecology at Olduvai Gorge, Tanzania as indicated by antelope remains. *Journal of Human Evolution* 27, 47–75.
- Potts, R.B., 1988. *Early Hominid Activities at Olduvai Gorge*. Aldyne de Gruyer, New York.
- Rosen, A.M., Weiner, S., 1994. Identifying ancient irrigation: a new method using opaline phytoliths from emmer wheat. *Journal of Archaeological Science* 21, 125–132.
- Runge, F., 1999. The opal phytolith inventory of soils in central Africa—quantities, shapes, classification and spectra. *Review of Palaeobotany and Palynology* 107, 23–53.
- Shipman, P., Harris, J.M., 1988. Habitat preference and paleoecology of *Australopithecus boisei* in Eastern Africa. In: Grine, F.E. (Ed.),

- Evolutionary History of the “Robust” Australopithecines. Aldyne de Gruyter, New York, pp. 343–381.
- Sikes, N.E., 1994. Early hominid habitat preferences in East Africa: palaeosol carbon isotopic evidence. *Journal of Human Evolution* 27, 25–45.
- Smith, F.A., Anderson, K.B., 2001. Characterization of organic compounds in phytoliths: improving the resolving power of phytolith  $\delta^{13}C$  as a tool for paleoecological reconstruction of C3 and C4 grasses. In: Meunier, J.D., Coline, F. (Eds.), *Phytoliths: Applications in Earth Sciences and Human History*. A.A. Balkema Publishers, Lisse, pp. 317–341.
- Twiss, P.C., Suess, E., Smith, R.M., 1969. Morphological classification of grass phytoliths. *Soil Science Society of America* 33, 109–115.
- Weiner, S., Goldberg, P., 1990. On-site Fourier transform-infrared spectrometry at an archaeological excavation. *Spectroscopy* 5, 46–50.
- Wheeler, E.A., Pearson, R.G., La Pasha, C.A., Zack, T., Hatley, W., 1986. Computer aided wood identification. *North Carolina Agricultural Service Bulletin* (474), 160.
- Wilding, L.P., Dress, L.R., 1969. Biogenic opal in soils as an index of vegetation history in the Prairie Peninsula. In: Bergstrom, R.E. (Ed.), *The Quaternary of Illinois*. University of Illinois Press, Urbana Special Publication 4, College of Agriculture.



### **4.3. Palaeoecological significance of palms at Olduvai Gorge, Tanzania, based on phytolith remains**

87

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI

L'ESTUDI DELS PROCESSOS DE FORMACIÓ DELS SEDIMENTS ARQUEOLÒGICS

I DELS PALEOSÒLS A PARTIR DE L'ANÀLISI DELS FITÒLITS , ELS MINERALS I ALTRES MICRORESTES

Dan Cabanes i Cruelles

ISBN:978-84-692-1535-7/DL-T-378-2009

ARTICLE IN PRESS



ELSEVIER

Available online at [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)



Quaternary International ■■■■■ ■■■■■ ■■■■■



## Palaeoecological significance of palms at Olduvai Gorge, Tanzania, based on phytolith remains

Rosa Maria Albert<sup>a,\*</sup>, Marion K. Bamford<sup>b</sup>, Dan Cabanes<sup>c</sup>

<sup>a</sup>Catalan Institution for Research and Advanced Studies (ICREA)/Department of Prehistory, Ancient History and Archaeology, University of Barcelona, c/ Montalegre, 6-8, E-08001 Barcelona, Spain

<sup>b</sup>Bernard Price Institute for Palaeontological Research, School of Geosciences, University of the Witwatersrand, P Bag 3, WITS 2050, South Africa.

<sup>c</sup>Institut Català de Paleoecologia Humana i Evolució Social, Àrea de Prehistòria, Universitat Rovira i Virgili, Programa de Beques Fundació Atapuerca, Plaça Imperial Tàrraco, 1, E-43005 Tarragona, Spain

### Abstract

Palms are among the most abundant, diverse and economically important families of plants in tropical and subtropical regions of the world; their number and diversity make them an important part of the ecosystem. Phytoliths are abundantly produced in palms, mainly the spheroid echinate type and, although their number decreases notably after their deposition in soils, they remain stable for long periods of time. Palm phytoliths were recovered from sediments at HWKEE, on the eastern palaeolake margin of the Olduvai basin during Lowermost Bed II (between Tuffs IF and IIA, 1.795–1.71 Ma). Their abundance in trench 107 (the only freshwater source recognised to date) occurs in three stratigraphically consecutive layers, the first one located immediately above the incision layer (40 cm above Tuff IF). Above these samples there are no palm phytoliths in the fossil record. The identification of the type of palms represented will be useful for determining the landscape distribution and nature of hominin activities along the lake margin and alluvial fan of the central Olduvai Basin. Here we use morphometric analysis of spheroid echinate phytoliths from fossil and modern palms (*Phoenix reclinata* and *Hyphaene petersiana*) and their corresponding soils to determine if the differences are significant and can be confidently applied to the fossil samples. Fossil and modern soil samples were found to be very similar to each other but the spheroid echinates from the fossil soils were bigger than the modern soil samples. Either the palms from the samples were different or there is a strong bias towards preserving phytoliths from the smaller end of the range. If this is the case then the implication would be that the fossil samples are the leaves and inflorescences of *Phoenix reclinata*. A wider variety of modern palms needs to be analysed.

© 2007 Elsevier Ltd and INQUA. All rights reserved.

### 1. Introduction

Olduvai Gorge in northern Tanzania is a well-known site with a rich vertebrate fossil record including hominins and stone artifacts from Plio-Pleistocene lacustrine and tuffaceous deposits (Leakey, 1971; Hay, 1976; Potts, 1988; Blumenschine et al., 2003). The site offers a good geographic and stratigraphic framework for the occupation by hominins of the basin and palaeolake margins (Hay, 1976, 1996) and this is being further refined by the multidisciplinary efforts of the OLAPP team members (Olduvai Landscape Palaeoanthropological Project). This work combines sampling of hominin activity traces over

broad spatial scales, throughout exposed deposits of the Plio-Pleistocene Olduvai Basin with detailed palaeoenvironmental analysis focusing on terrain, hydrology and vegetation (Peters and Blumenschine, 1995; Blumenschine and Peters, 1998; Blumenschine et al., 2003). Models of palaeolandscape ecology and hominin land use highlight the central role of the landscape distribution and cover abundance of herbaceous and woody vegetation in determining the landscape distribution and nature of hominin activities throughout the lake margin and alluvial fan landscapes of the central Olduvai Basin.

A variety of methods have been employed to interpret the palaeoenvironments of early hominin sites since it is generally accepted that the vegetation and climate affect the distribution and behaviour of the hominins and other faunas. The sedimentological record provides

\*Corresponding author. Tel.: +34934037525; fax: +34934037541.  
E-mail address: [rosamaria.albert@icrea.es](mailto:rosamaria.albert@icrea.es) (R.M. Albert).

## ARTICLE IN PRESS

2

R.M. Albert et al. / Quaternary International ■ (■■■■) ■■■-■■■

broad palaeoecological signatures such as fluvial (earthy claystone), lacustrine (waxy claystone), volcanic (tuffs) or dune settings. Isotope analyses of carbonates can provide a temperature and moisture regime. Faunal composition and comparison with modern faunas is another common method employed. Pollen analyses show what plants were present in the area and show a general drying out trend from Uppermost Bed I through Bed II based on a combination of several sites. Wooded grassland was present during Bed I times and by uppermost Bed I it was reduced to semidesert scrub. Above Tuff If (Lowermost Bed II) wooded grassland occurred and developed into *Acacia* woodland (Bonniefile, 1984). Palm is extremely rare with only one grain of *Phoenix* type pollen from the site FLKN in Bed I deposits between Tuff ID and IF (Bonniefile, 1984).

More recently detailed fossil macroplants and phytolith studies have been performed in the area for Lowermost Bed II (Albert et al., 2006; Bamford et al., 2006). Their studies were focused on interpreting the vegetation structure and composition of a portion of the eastern lake margin including localities FLK, VEK, HWKE, HWKEE, and MCK, over a distance of about 2 km and during lowermost Bed II times, about 80 kyr. They interpreted the vegetation during this time to be composed of a variety of grasses, sedges and dicotyledonous plants in different proportions and in different areas. In one specific place (HWKEE, T-107), phytoliths have shown palm trees to be dominant (Fig. 1) and present at VEK.

Macroplant remains of sedges, grasses and woody dicots are widespread (Hay, 1976; Bamford et al., 2006) but palm macroplants have not been reported to date in any sites in Olduvai Gorge. It is interesting to note that palm

phytoliths occurred at HWKEE, the freshwater source for the palaeolake (Hay, 1976) and only during a short time interval.

Since palms are among the most abundant, diverse and economically important families of plants in the tropical and subtropical regions of the world, their number and diversity make them an important part of the ecosystem. They are found in a variety of habitats, from tropical forests to mangrove swamps, from upland woodlands to oases in deserts (Henderson, 2002). The question posed is, what climatic signature do the Olduvai palm phytoliths give?

Nine genera of palms occur naturally in East Africa and another three genera have become naturalised (Dransfield, 1986). Two introduced taxa are restricted to the coast (*Areca catechu* and *Cocos nucifera*). Two indigenous taxa occur in gallery or swamp forest (*Elaeis guineensis* and *Raphia farinifera*). The others are more widespread. *Borassus aethiopicum* occurs in grasslands with high water tables. *Hyphaene compressa* (doum palm) grows along the coast and along seasonal water courses. *Hyphaene coriacea* grows on sand dunes, creeks and rarely inland, whereas *Hyphaene petersiana* is usually confined to alkaline soils where there is a relatively high water table. *Phoenix reclinata* (wild date palm) occurs along water courses, in lowlands and also higher up rocky hills especially in protected steep valleys (Dransfield, 1986; Beentje, 1994). Other naturally occurring taxa are the large single stemmed *Borassus* and climbing *Eremospatha*, *Laccosperma*, *Calamus* and *Chrysalidocarpus*, which have a thin trunk and are outliers of a Madagascan genus (Dransfield, 1986).

Phytoliths are produced abundantly in palm trees (Bamford et al., 2006), mainly the spheroid echinate type

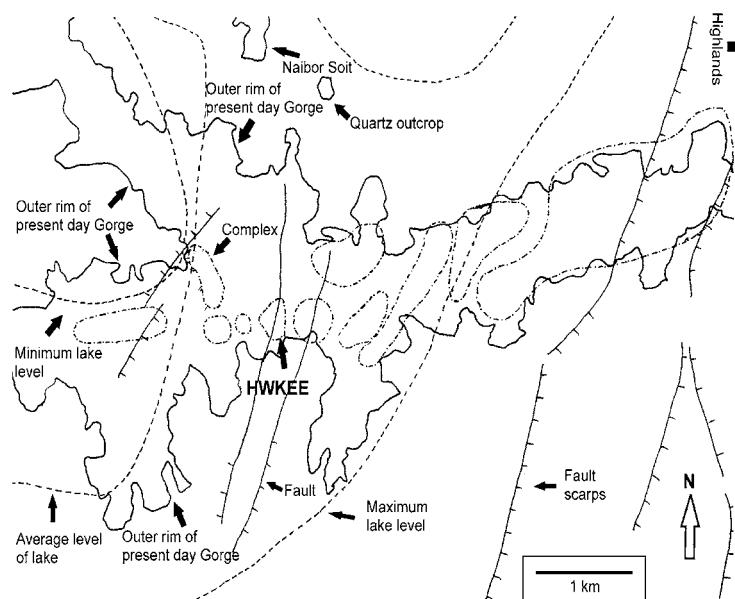


Fig. 1. Map of the Olduvai Gorge showing the location of HWKEE, where T-107 has been studied.

## ARTICLE IN PRESS

R.M. Albert et al. / Quaternary International ■ (■■■■) ■■■-■■■

3

(globular according to the ICPN, Madella et al., 2005) and, although their number decreases notably after the deposition of plant parts in the soils, once deposited, they remain stable for long periods of time (Albert et al., 2006).

From previous studies on modern palm material (Bamford et al., 2006) we know that there are some differences between the phytoliths from different palm species and also from different parts of the palm plant (leaves, flowers, dry rachis). Here we look more closely at the phytoliths, using morphometric analyses, to determine if the differences are significant and if they can be applied confidently to the fossil samples from the site HWKEE on the eastern palaeolake margin of the Olduvai basin during the short time interval of Lowermost Bed II (between Tuffs IF and IIA, 1.795–1.71 Ma; (Hay, 1976; Blumenschine et al., 2003).

## 2. Materials and methods

Three types of samples are considered here, namely fossil sediments, modern soils and modern plants. Fossil samples and their corresponding phytoliths from HWKEE which contained palm phytoliths (T107-2, T107-4 and T107-5) were morphometrically analysed (Bamford et al., 2006). A few palm phytoliths had been recovered from the locality VEK but the sequence at HWKEE showed a variation in abundance over time and this was considered to be more interesting. Results were then compared to a phytolith study from modern plants and modern soils collected immediately below the palms.

Phytoliths were extracted from the modern palm trees occurring in an area considered to be analogous of Lowermost Bed II and the eastern palaeolake margin based on a variety of factors: topography, aspect, water, soils, fauna, (Albert et al., 2006; Bamford et al., 2006; Njau and Blumenschine, 2006), namely the shallow, saline-alkaline lakeshores of Lake Manyara where the ground water forest opens out into clumped mixed palm bushland. The common trees here are *Hyphaene petersiana*, *Phoenix reclinata*, *Acacia albida*, *Acacia xanthophloea*, *Senna* spp., *Malvaceae*, *Ziziphus mucronata* and woody herb *Achyranthes aspera*.

The most common palms were sampled for comparison at Lake Manyara and are *Phoenix reclinata* that forms dense clumps with other trees in the alluvial plains, and the single stemmed *Hyphaene petersiana*, which is widely scattered on the alluvial plain.

*Phoenix reclinata*, or the wild date palm, occurs naturally from the Eastern Cape to as far north as Egypt and is commonly found in riverine bush and forest. Plants can reach up to 12 m but are most often between 3 and 6 m. These may be either single or multi-stemmed, sometimes forming a dense, bushy clump. The abundant ripe fruit is eaten by birds, monkeys and baboons and the fallen fruit is eaten by bushpig, nyala and bushbuck. The wild date will tolerate light frost and waterlogged conditions.

These palms characteristically have sharp spines on the basal portion of the fronds.

*Hyphaene petersiana*, the ilala palm, grows in hot and dry environments, but will probably tolerate high rainfall if the soils are well drained. The large, round fruit, with a hard white nut (hence the common name of vegetable ivory) is a favorite food of elephants. Based on years of field work, Ellery and Ellery (1997) found that *Phoenix reclinata* occurs close to freshwater along the edges of islands and river banks in the Okavango Delta, Botswana. It may form dense clumps and be associated with termitaria. *Hyphaene petersiana* frequently occurs towards the middle of the islands (Ellery et al., 1997; personal observation) and is associated with a high water table but its occurrence indicates the presence of saline groundwater (Ellery and Ellery 1997).

The fresh palm material was collected from single trees and separated into leaves, inflorescence, rachis roots and seeds and processed separately. Since palms produce huge amounts of palm phytoliths (Bamford et al., 2006), only one sample from each plant part was analysed. Modern soil samples from below the extant palms (SS2, SS4) were also analysed because previous results have shown that some phytolith morphologies are lost in the soil samples (Albert et al., 2006).

### 2.1. Preparation of modern plants

The methods used for the extraction of phytoliths are described in Bamford et al (2006). Washed and air dried aliquots were weighed and burned in a muffle furnace at 500 °C for 4 h. The ash was treated with an equivolume solution of 3N HCl and 3N HNO<sub>3</sub> for 30 min at 100 °C, to leave only the siliceous minerals, where phytoliths are included. This is referred to as the inorganic acid insoluble fraction (from now on AIF). The AIF was then centrifuged, re-suspended in deionised water and centrifuged again. The supernatant was discarded and the washing was repeated three times. When necessary, the AIF was re-ashed at 500° for 90 min and then weighed to an accuracy of 0.1 mg.

### 2.2. Preparation of modern and fossil soil samples

The phytolith extraction method was described in Albert et al. (2006). A weighed aliquot of about 1 g of air-dried sediment was treated with 10 ml of an equivolume solution of 3 N HCl and 3 N HNO<sub>3</sub> for 30 min and then centrifuged to eliminate the carbonates and phosphates present in the soils. After washing the pellet with water the organic material was oxidised with 30% hydrogen peroxide at 70 °C. The sample was dried and the remaining sediment was weighed.

Mineral components of the AIF were separated according to their densities in order to concentrate the phytoliths by adding 5 ml of sodium polytungstate solution [Na<sub>6</sub>(H<sub>2</sub>W<sub>12</sub>O<sub>40</sub>)·H<sub>2</sub>O] of 2.4 g/ml density. The suspension was

centrifuged and the supernatant was transferred to another centrifuge tube; 1.0 ml of deionised water was added and the tube was vortexed and again centrifuged as above. This cycle was repeated until no visible mineral particles remained in the supernatant. The heavy liquid was then diluted by filling the centrifuge tube with deionised water, to ensure that even the lightest minerals are recovered.

Slides were prepared by weighing approximately 1 mg of sample, with an accuracy of 0.1 mg, onto a microscope slide and mixed with Entellan New (Merck). The aerial coverage of the sample on the slide was estimated by counting the total number of fields containing sample grains. Slides were studied using an Olympus BX41 optical microscope and digital images were taken with a digital camera Olympus Camedia C-5060 and stored with Olympus DP soft 5.0 software.

A minimum of 200 phytoliths was counted, whenever possible, in all the analysed samples. Previous results (Albert and Weiner, 2001) indicate that the counting of only 50 phytoliths with diagnostic morphologies gives an error margin of 40% and is considered too unreliable for interpretation, whereas the counting of 200 diagnostic phytoliths gives an error margin of around 20%. Siliceous fragments were not counted.

### 2.3. Morphometric measurements

Morphometric analysis of phytoliths is an effective tool for differentiating between phytoliths produced by closely related taxa. To date, morphometric measurements have been mainly applied to grass phytoliths to identify different types of cereals to the species levels (Pearsall et al., 1995; Zhao et al., 1998; Ball et al., 1999; Berlin et al., 2003). Here we apply morphometric measurements to the spheroid echinate morphology, to evaluate the possibility of using morphometric measurements to identify palm taxa. A similar type of study has been performed on Easter Island, where Delhon tried to identify the rachis, leaves and trunk from different palm trees native to the island through the morphometry of spheroid echinate phytoliths (Delhon and Orilac, 2004).

Between 30 and 50 spheroid echinate morphologies from each sample (fossil, modern soils and plant parts of modern plants) have been morphometrically analysed. Different morphometric parameters have been used to observe possible differences among these morphologies from modern plants. The results were then compared to the same morphologies from the modern plant reference collection and the modern soils collected immediately below these plants. The following parameters are selected (Fig. 2):

- The measure of the area of randomly selected spheroid echinate morphologies. Two different areas were measured, large area (includes the protuberances) and small area (with no protuberances). The comparison between the areas provides information on the length

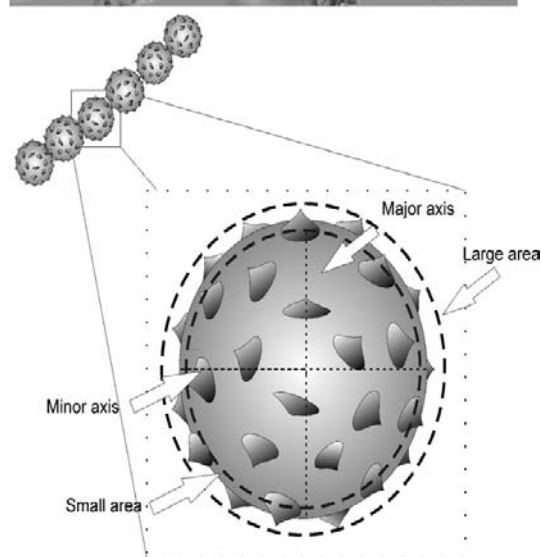
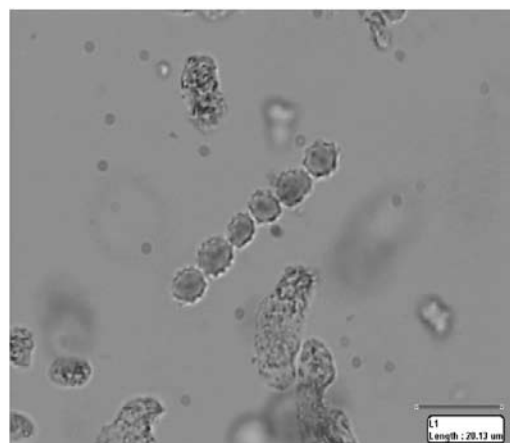


Fig. 2. Photomicrographs of spheroid echinate morphologies from *Phoenix reclinata*, 400 $\times$ , and drawing of palm phytolith showing the parameters selected for morphometric measurements.

of the protuberances, another parameter that has also been taken into account.

- The axis of the spheroid morphologies. These morphologies are not completely spherical, therefore the major and the minor axes were measured. The ratio between them indicates the degree of sphericity of the morphologies measured.

If there is a significant difference between at least one of the selected features then we will be able to differentiate between palm species and/or plant parts. Moreover it would then be possible to show differences in taxa or plant parts between the stratigraphic levels of the fossil samples, in other words, changes in plant taxa over time.

### 3. Results

The abundance of palm phytoliths noted in the HWKEE area, in trench 107, occurs in three stratigraphically

## ARTICLE IN PRESS

R.M. Albert et al. / Quaternary International ■ (■■■■) ■■■-■■■

5

extensive layers, the first one located immediately above the incision layer (here 40 cm above Tuff IF), and the other two samples 30 and 70 cm above the first. The lowest sample, T107-2 is in waxy claystone above a concretionary layer. The middle sample in earthy claystone (T107-4) and the upper or youngest sample (T107-5) is in waxy–earthy claystone. Above these samples there are no palm phytoliths in the fossil record (preliminary results).

The morphological analyses of these samples indicate that spheroid echinate morphologies, characteristic of palms, are accompanied by other plant phytoliths (Figs. 3a and b, 4). These results clearly show the dominance of spheroid echinate morphologies. Other plant groups, such as grasses, are also present, although in much lower numbers. Spheroid morphologies with *psilate* or *scabrate* surfaces have been grouped separately since these morphologies have been observed in the flowers and seeds of *Hyphaene petersiana* (Bamford et al., 2006). This type of morphology is observed in the two younger samples, although not in abundance. Instead there is a greater

proportion of monocot phytoliths that could not be ascribed to any of the grasses, sedges or palms. This indicates that there was a shift to different proportions of the plant groups (taxa undefined) after the dominance of palms immediately above the incision or concretionary layer.

Concentrating only on the palm spheroid echinate morphologies the degree of sphericity is shown as well as the relation between the major and minor axes (length and breadth) of the phytoliths. A high degree of sphericity is shown by morphologies very close to the line (Fig. 5). Both modern soil samples and the three fossil samples have small and almost spherical phytoliths. The phytoliths from *Hyphaene petersiana* modern soil and the inflorescence of *Phoenix reclinata* are the most similar to the fossil samples (inside oval outline). The difference between the modern soils below *Hyphaene* and *Phoenix reclinata* lies in the size, smaller in the latter, although both show a similar degree of sphericity. The rest of the modern plant reference collection samples show larger sizes, a greater range in sizes, especially within *Phoenix reclinata* plant parts, and notably less spherical.

In comparing the measurements of the area of the spheroid echinates including protuberances with the area excluding the protuberances (Fig. 6), the fossil samples are in the same range as, and close to, the *Hyphaene petersiana* soil and *Phoenix reclinata* inflorescence samples, a trend also seen in the comparison of sphericity (Fig. 5). Fossil sample T107-5 is a little removed from this cluster and seems to present more similarities to the leaves of *Phoenix reclinata*. Again the rest of plant parts present a much higher diversity with larger sizes.

The comparison of all the measurements taken can be seen in Fig. 7. The Euclidean cluster which measures the distance between the different samples shows that the phytoliths from the fossil samples T107-2 and T107-4 are closer to those from *Hyphaene* soil and *Phoenix* inflorescence. Fossil sample T107-5, although similar to the other fossil samples, presents more similarities to the leaves of *Phoenix reclinata*. The rest of modern plant reference samples present major differences in respect to both fossil and modern soils.

#### 4. Discussion

Analysis of modern samples shows that *Phoenix reclinata* leaves, flowers and rachis produce between two and three times as many total phytoliths as the equivalent parts in *Hyphaene petersiana* (e.g. *Hyphaene* leaves 46 million and *Phoenix* leaves 131 million, phytoliths per gram of acid insoluble fraction; Bamford et al., 2006, Table 1). The soils from under these palms at Lake Manyara produced very similar total amounts of phytoliths (*Phoenix reclinata*: 15.7 million and *Hyphaene petersiana* 18 million per 1 g AIF; Albert et al., 2006, Table 1) and this is about 10 times greater than any of the other plant groups. Since relative amounts are calculated, not total numbers, it is not

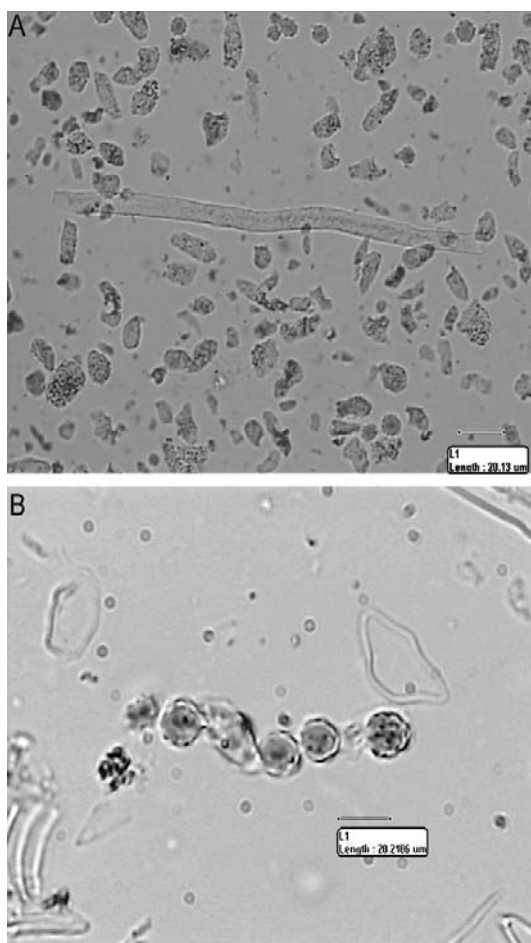


Fig. 3. Photomicrographs of phytoliths identified in modern plants. (a) General view of the slide showing the variety of forms present; (b) spheroid palm phytoliths with major *scabrate* surface.

## ARTICLE IN PRESS

6

R.M. Albert et al. / Quaternary International ■ (■■■■) ■■■-■■■

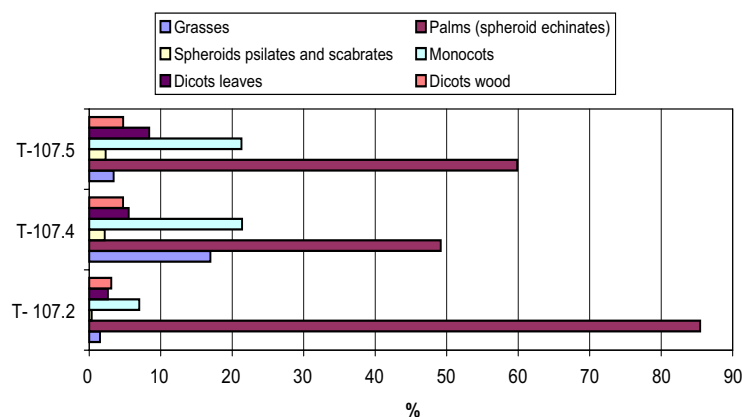


Fig. 4. Percentages of phytoliths morphologies from the fossil samples from HWKEE trench 107; T-107-2 is the lowest and oldest sample, T-107-4 is in between and T-107-5 is the highest and youngest.

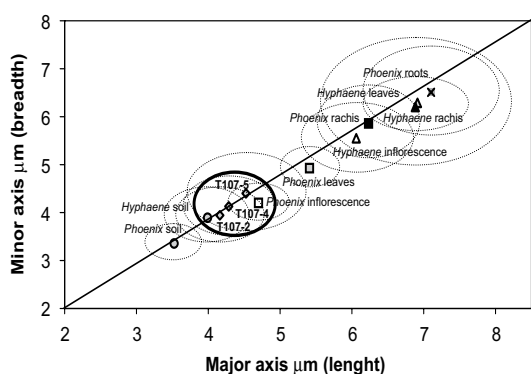


Fig. 5. Degree of sphericity of the spheroid echinate morphologies, size in  $\mu\text{m}$ . Minor axis is the breadth and the major axis is the length of the phytoliths.

possible to determine what is the real loss in number of phytoliths from plant to soil. Nonetheless the overall loss is greater for *Phoenix reclinata* than for *Hyphaene petersiana*. It is unknown why this should be the case. Neither the mineral composition of the fossil soils (alkali feldspar, zeolite and low calcite; Bamford et al., 2006, Table 2) nor the bulk minerals of the modern soil samples (clay, calcite and opal; Albert et al., 2006, Table 1) can explain differences on the preservation of phytoliths. We have to assume that other factors have affected the preservation of phytoliths. If we consider only the spheroid echinate morphologies: in the living palm plant parts the spheroid echinates comprise from 27% to 90% of the phytolith morphologies; in the soils below palms they comprise 15% but in the fossil soils that increase to 31% (Albert et al., 2006, Table 2). One explanation is that non-spheroid echinate morphologies have been lost over time and possibly more robust spheroid echinates have survived so they appear more common. Morphologies such as elongate granulate surfaces and various parallelepipeds that occurred in living *Phoenix reclinata* are not preserved and morphologies representative of other plant groups may

also be disproportionately lost (Albert et al., 2006, Table 2). There is a taphonomic bias against the preservation of certain morphologies; there may well be a similar bias against larger or smaller forms. In addition, the degradation of organic material can considerably reduce the volume of the sediments through time concentrating the phytoliths in a thinner layer (Albert et al., 2007), and this could explain the increase of the surviving spheroid echinate morphologies in fossil samples.

The morphometric approach performed to characterise the palms present in the fossil samples show that these samples are very similar to each other but the spheroid echinates are a little bigger than the modern soil samples. This would imply that we are probably not dealing with exactly the same source of phytoliths, so the palms in the fossil record were probably not *Phoenix reclinata* and *Hyphaene petersiana*, unless there is a strong bias to preserving phytoliths from the smaller end of the range. We have already noted that there is some loss of phytoliths from the modern plants to the modern soils (Albert et al., 2006) and this affects mostly the larger morphotypes. There are two possible reasons: (i) leaves and flowers are less hardy than the other plant parts and are shed seasonally, seeds are eaten and carried away, and (ii) a variety of post-depositional processes that can affect the preservation of phytoliths such as soil type, sediment size and pH, water activity, soil movement, i.e. bioturbation. Lake Manyara modern soil samples, however, yielded palm phytoliths preserved in relatively good condition that apparently were hardly affected by post-depositional processes (Albert et al., 2006). Thus, the reason for the loss of phytoliths in the modern soils from Lake Manyara could be more related to some type of biostratinomic process. It is reasonable to assume then, that a similar type of processes could take place during the formation of the Lowermost Bed II.

In the modern soil and fossil samples it is not possible to distinguish between the phytoliths from leaves, flowers, seeds, rachis and roots. Clearly, there is a difference



## ARTICLE IN PRESS

R.M. Albert et al. / Quaternary International ■ (■■■■) ■■■-■■■

7

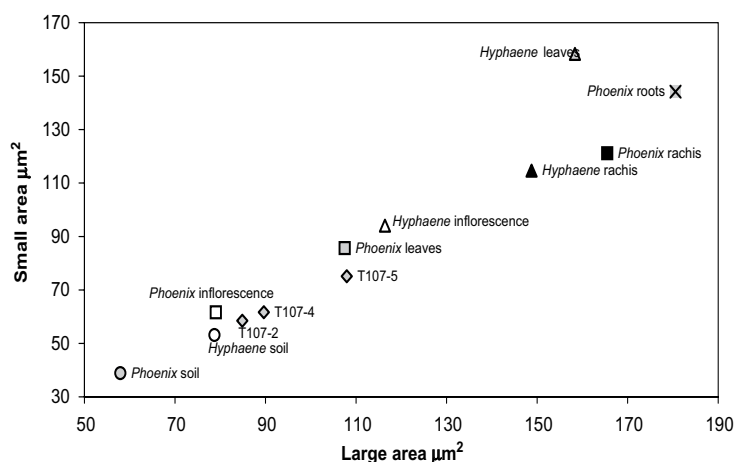


Fig. 6. Relative areas of the phytoliths: vertical axis represents the small area (excluding the protuberances) the horizontal axis shows the large area (including the protuberances).

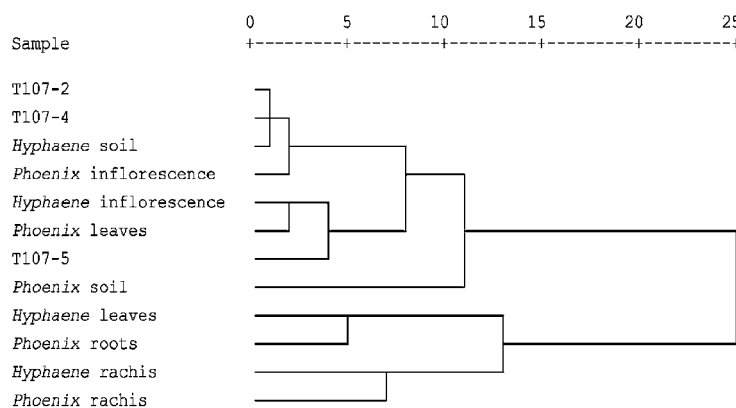


Fig. 7. Hierarchical cluster analysis, using squared Euclidean distance, of phytolith spheroid echinate morphologies from the modern plant and modern soil reference collection as well as fossil samples. The variables analysed are: major and minor axis and large and small area.

between the samples T-107.2 and T-107.4 in relation to the sample T-107.5. The first two samples resembling *Hyphaene* soil, whereas sample T-107.5 is more related to the leaves of *Phoenix* and the inflorescence of *Hyphaene*. If there is a taphonomic bias towards preserving the smaller phytoliths then the implication would be that the fossil samples are the leaves of *Phoenix reclinata* for the sample T-107.5, and the inflorescence of *Phoenix reclinata* for samples T-107.2 and T107.4. If that is the case then the palaeoenvironmental reconstruction would favour a freshwater setting. The single pollen grain of *Phoenix*-type recorded by Bonnefille (1984) provides limited support for this reconstruction. Clearly a much larger sample size with more samples of the same species to see if there is intraspecific variation, and other species of palms is necessary before any reliable interpretation can be made. We are confident, however, that palms occurred at HWKEE, the eastern palaeolake margin of Olduvai Gorge, for a short time during Lowermost Bed II times although we cannot determine the relative abundance.

Palms are an important part of the modern ecosystems associated with water (open or below ground) and add an important element to the vegetation reconstruction. If we knew which palms were preserved then a detailed ecosystem reconstruction could be attempted.

## 5. Conclusions

Palms were present during a short period of time in the Olduvai Gorge during the deposition of the lowermost Bed II layers at HWKEE area. Moreover, their presence seems to be related to the existence of a freshwater source.

The results obtained from this preliminary study indicate that there is a relatively important loss of palm phytoliths between their production in the plants and their deposition in soils. This loss seems to be related to both biostratigraphic processes and post-depositional processes, and affects mostly the larger sized phytoliths. This biased preservation, seemingly in favour of the smaller sizes of spheroid morphologies, does not allow for identification to the level

## ARTICLE IN PRESS

of genus at this stage. More sampling and analysis of the same taxa, from the same area and also from different regions, will determine the full potential of this morphometric approach for palm identifications. Furthermore, although there are important differences among palm plant parts of living samples, these are not reflected in the fossil samples record. The reason for this should be further explored by the addition of more modern palms and their corresponding soils.

### Acknowledgements

We thank the Tanzanian Commission for Science and Technology (COSTECH), the Tanzanian Department of Antiquities and the Ngorongoro Conservation Area Authority for permission to carry out this research. We thank also the *Agència de Gestió d'Ajuts Universitaris i de Recerca*, of the *Departament d'Educació i Universitats, Generalitat de Catalunya* (Spain) for the financial support received by RMA to carry out the project: *Ecologia del paisatge i pautes de supervivència dels primers homínids a la Gorja d'Olduvai (Tanzània): la reconstrucció de la vegetació durant el Plio-plistocè, for the years 2006, 2007 and 2008 (2006EXCAVA00019)*. The Palaeontological Scientific Trust, South Africa (PAST) is thanked for financial support for field work for MKB. The research work of Dan Cabanes is supported by a predoctoral grant from the Fundació Atapuerca.

### References

- Albert, R.M., Weiner, S., 2001. Study of phytolith in prehistoric ash layers from Kebara and Tabun caves using a quantitative approach. In: Meunier, J.D., Colin, F. (Eds.), *Phytolith: Applications in Earth Sciences and Human History*. A.A. Balkema Publishers, Lisse, pp. 251–266.
- Albert, R.M., Bamford, M.K., Cabanes, D., 2006. Taphonomy of phytoliths and macroplants in different soils from Olduvai Gorge (Tanzania) and the application to Plio-Pleistocene palaeoanthropological samples. *Quaternary International* 148, 78–94.
- Albert, R. M., Shahack-Gross, R., Cabanes, D., Gilboa, A., Lev-Yadun, S., Portillo, M., Sharon, I., Boaretto, E., Weiner, S., 2007. Phytolith-rich layers from the Late Bronze and Iron Ages at Tel Dor (Israel): mode of formation and archaeological significance. *Journal of Archaeological Science*. in press. doi:10.1016/j.jas.2007.02.015.
- Ball, T.B., Gardner, J.S., Anderson, N., 1999. Identifying inflorescence phytoliths from selected species of wheat (*Triticum monococcum*, *T. dicoccum*, *T. dicoccoides*, and *T. aestivum*) and barley (*Hordeum vulgare* and *H. spontaneum*) (Gramineae). *American Journal of Botany* 86 (11), 1615–1623.
- Bamford, M.K., Albert, R.M., Cabanes, D., 2006. Plio-Pleistocene macroplant fossil remains and phytoliths from Lowermost Bed II in the eastern palaeolake margin of Olduvai Gorge, Tanzania. *Quaternary International* 148, 95–112.
- Beentje, H.J., 1994. *Kenya Trees, Shrubs and Lianas*. National Museums of Kenya, Nairobi, Kenya.
- Berlin, A.M., Ball, T., Thompson, R., Herbert, S.C., 2003. Ptolemaic agriculture, “Syrian wheat,” and *Triticum aestivum*. *Journal of Archaeological Science* 30 (1), 115–121.
- Blumenschine, R.J., Peters, C.R., 1998. Archaeological predictions for hominid land use in the paleo-Olduvai Basin, Tanzania, during lowermost Bed II times. *Journal of Human Evolution* 34 (6), 565–607.
- Blumenschine, R.J., Peters, C.R., Masao, F.T., Clarke, R.J., Deino, A.L., Hay, R.L., Swisher, C.C., Stanistreet, I.G., Ashley, G.M., McHenry, L.J., Sikes, N.E., van der Merwe, N.J., Tactikos, J.C., Cushing, A.E., Deocampo, D.M., Njau, J.K., Ebert, J.I., 2003. Late Pliocene *Homo* and hominid land use from western Olduvai Gorge, Tanzania. *Science* 299 (5610), 1217–1221.
- Bonnefille, R., 1984. Palynological Research at Olduvai Gorge. *National Geographic Society Research Reports* 17, 227–243.
- Delhon, C., Orilac, C., 2004. Extinct palms of Easter Island: the contribution of phytolith analysis. In: VI International Conference on Easter Island and the Pacific. Viña del Mar, Chile.
- Dransfield, J., 1986. *Palmae*. In: Polhill, R.M. (Ed.), *Flora of Tropical East Africa*. East African Governments. A.A. Balkema, Rotterdam.
- Ellery, K., Ellery, W., 1997. *Plants of the Okavango Delta*. Tsaro Publishers, Durban.
- Hay, R.L., 1976. *Geology of the Olduvai Gorge, A Study of Sedimentation in a Semi-arid Basin*. University of California Press, Berkeley.
- Hay, R.L., 1996. Stratigraphy and lake-margin palaeoenvironments of Lowermost Bed II in Olduvai Gorge. *Kaupia (Darmstadter Beiträge zur Naturgeschichte)* 6, 223–230.
- Henderson, A., 2002. *Evolution and Ecology of Palms*. New York Botanical Garden Press, Bronx, NY.
- Leakey, M.D., 1971. Olduvai Gorge, vol. 3. In: *Excavations in Beds I and II, 1960–1963*. University Press, Cambridge.
- Madella, M., Alexandre, A., Ball, T., 2005. International code for phytolith nomenclature 1.0. *Annals of Botany* 96 (2), 253–260.
- Njau, J.K., Blumenschine, R.J., 2006. A diagnosis of crocodile feeding traces on larger mammal bone, with fossil examples from the Plio-Pleistocene Olduvai Basin, Tanzania. *Journal of Human Evolution* 50 (2), 142–162.
- Pearsall, D.M., Piperno, D.R., Dinan, E.H., Umlauf, R., Zhao, Z.J., Benfer, R.A., 1995. Distinguishing rice (*Oryza sativa* Poaceae) from wild *Oryza* species through phytolith analysis—results of preliminary research. *Economic Botany* 49 (2), 183–196.
- Peters, C.R., Blumenschine, R.J., 1995. Landscape perspectives on possible land-use patterns for Early Pleistocene hominids in the Olduvai Basin, Tanzania. *Journal of Human Evolution* 29 (4), 321–362.
- Potts, R., 1988. Early hominid activities at Olduvai. *Foundations of Human Behavior*. A. de Gruyter, New York.
- Zhao, Z.J., Pearsall, D.M., Benfer, R.A., Piperno, D.R., 1998. Distinguishing rice (*Oryza sativa* Poaceae) from wild *Oryza* species through phytolith analysis, II: finalized method. *Economic Botany* 52 (2), 134–145.

## **5. L'Abric Romani**

**97**

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI

L'ESTUDI DELS PROCESSOS DE FORMACIÓ DELS SEDIMENTS ARQUEOLÒGICS

I DELS PALEOSÒLS A PARTIR DE L'ANÀLISI DELS FITÒLITS , ELS MINERALS I ALTRES MICRORESTES

Dan Cabanes i Cruelles

ISBN:978-84-692-1535-7/DL-T-378-2009

**5.1. Hearth structure and function at level J  
(50kyr,bp) from Abric Romaní (Capellades,  
Spain): phytolith, charcoal, bones and stone-  
tools**

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI

L'ESTUDI DELS PROCESSOS DE FORMACIÓ DELS SEDIMENTS ARQUEOLÒGICS

I DELS PALEOSÒLS A PARTIR DE L'ANÀLISI DELS FITÒLITS , ELS MINERALS I ALTRES MICRORESTES

Dan Cabanes i Cruelles

ISBN:978-84-692-1535-7/DL-T-378-2009

## PART 3: APPLICATIONS IN ARCHAEOLOGY

# 7 Hearth structure and function at level J (50kyr, bp) from Abric Romaní (Capellades, Spain): phytolith, charcoal, bones and stone-tools

*D. Cabanes, E. Allué, J. Vallverdú, I. Cáceres, M. Vaquero and I. Pastó*

### *Introduction*

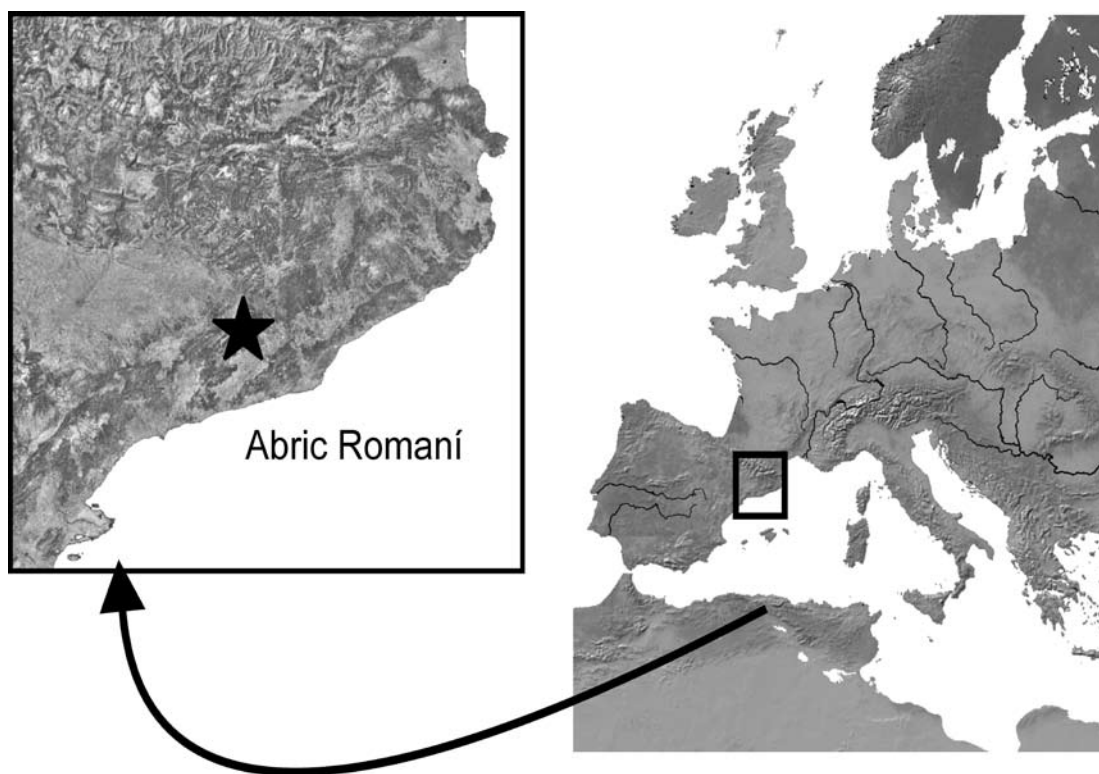
The Abric Romaní is an extensive excavation that enables us to recognize the anthropic activities that took place in the rock-shelter and how inhabitants organized their space. The object of this study is focused on level J, where at least fifty hearths or related structures have been identified. In the last few years this level has been exhaustively studied and the hearths have been the focus of most of these investigations (Allué 2002, Arteaga *et al.* 2001, Cáceres 2002, Cáceres *et al.* 2002, Carbonell *et al.* 1996, Pastó *et al.* 2000, Vallverdú 2002, Vaquero and Pastó 2001). Hearths structure and function has been analysed through different disciplines such as anthracology, archaeozoology, lithic studies, spatial distribution and soil micromorphology. Concerning the opal phytoliths, there are the results from some samples from level I analysed by Juan-Tresserras (in Carbonell 2002), while the present contribution is based on the MA Thesis of the first author (Cabanes 2002). The combination of all these studies allows us to evaluate the grade of complexity of the behaviour of the Middle Palaeolithic rock-shelter inhabitants, recognize the way that these people used fire and go beyond the typological classifications done during the field work.

### *The Abric Romaní site*

Abric Romaní site is located at the northeast part of the Iberian Peninsula, 50 km from Barcelona (Fig. 7.1). The

site is situated in a travertine cliff in the town of Capellades, at 310 m asl. The sequence has been dated by U/Th series with dates of 70 Kyr BP at the base of the sequence and 39 Kyr BP at the top of the sequence (Bischoff *et al.* 1988). The date for the Level J top is  $49.3 \pm 1.6$  Kyr BP, and the bottom of the level is dated at  $50.8 \pm 0.8$  Kyr BP (Bischoff *et al.* 1988). This indicates sedimentary processes with a high chronostratigraphic resolution (Vallverdú 2002). The deposits preserve at least 17 archaeological layers that correspond to Middle Palaeolithic occupations, with the exception of the top layer (layer A), which corresponds to the Upper Palaeolithic (Carbonell *et al.* 1996).

Archaeological level J is situated in a stratigraphic succession of rock fall at the base of the travertine cornice. The extensive excavation has allowed us to establish three sedimentary zones: near the cave wall, underneath the roof of the shelter and the external area. These deposits are formed by alternation of gravel and sand beds, and of sand and rock beds, which represents debris dislodged from the rock-shelter. The mobilization mechanisms for every type of gravel or rock bed are predominantly fragmentation or granular spalling. Sedimentation by gravity is focused mainly in the flat zones near the wall and under the shelter roof. However, in the external zone, which is more sloping, pure gravity sedimentation disappears and sedimentation by laminar flows appears. In the zones near the wall and under the shelter overhang chemical sedimentation of travertines is present when the mobilization by granular spalling is dominant.



*Fig. 7.1 Localization of the Abric Romaní site.*

102

The facies association in level J is similar to stratified talus proximal successions. The vertical profile exhibits a decrease in grain size and an increase in layer thickness towards the top. Palaeoclimatic interpretation of the microfacies shows an increase in humidity and temperature towards the top of the level, which correlates with an increase in granular exfoliation and soil formation processes. Rate of travertine growth varies within the dripping environment of the rockshelter. These travertines, which mark the boundaries of level J, have been dated by U/Th at 50.4 kyrs for the bottom of the level and 43.9 Kyrs for the top. Another date of 49.9 Kyrs is reported for the layer between level Ja and Jb. The dates obtained from this layer display coherent stratigraphic relationship from bottom to top.

Level Ja, which was excavated between 1993 and 1998 over a surface of 200 sqm, yielded one of the most complex archaeological layers of the site.

### ***The hearths***

The sedimentological features of the site and the material found in and around the hearths permit to distinguish the combustion structures from other natural processes that could have produced similar coloration of the sediment. The level of preservation of each hearth depends on the burial environment, however, in general terms, the fireplaces from the Abric Romaní are well preserved (Vallverdú 2002).

The primary types of fireplaces found in the site, according to Arteaga *et al.* (2001), are:

- Flat hearths resting directly on the old surface without any kind of preparation;
- Hearths on natural depressions or in excavated depressions;
- Hearths delimited by rocks.

The thermal alterations usually have more or less circular shape. The coloration, determined with the help of a Munsell Soil Chart, varies from brown reddish (rubefaction) to black. This coloration shows a gradation from more to less intensity when the sediments from the hearths are in situ. Homogeneity of grain size and grade of alteration of the sediment have been observed. Most of the hearths are surrounded by, and have inside them, other archaeological remains that are described below.

### ***Archaeobotanical remains, bones and stone-tools***

The archaeobotanical remains are represented by pollen, charcoal, and wood and leaf imprints. Level Ja is situated between pollen zones 3 and 4 according to Burjachs and Julià (Burjachs and Julià 1994). Zone 3 is dated between 57,000 BP and 50,000 BP, and it is characterized by a relatively cold phase, with climatic oscillations of about 1000 years, and the dominant pollen is from *Artemisia*,



Poaceae, and *Pinus*. Zone 4 (50,000–46,000 BP) indicates a dry and cold climate with predominance of Asteraceae, Poaceae, and *Artemisia* pollen and low arboreal percentages (Burjachs and Julià 1994). The results of the charcoal identification, based on 880 charcoal fragments, show a dominance of *Pinus sylvestris* type representing 73% of the remains. The rest of the taxa are *Pinus sp.*, undetermined conifers and a single fragment of *Salix sp.* Therefore it is probable that the availability and abundance of pine tree branches made this wood preferable to other types of fuelwood.

The archaeozoological studies show that several taxa are present in the whole sequence. There are high percentages of Equidae and Cervidae, as well as, but with lower frequencies, of Bovidae, Rhinocerotidae and carnivores (Carbonell *et al.* 1996). Bone remains are distributed along the whole surface and they show different degrees of thermal alteration as well as other anthropic modifications such as cut marks and breakage due to butchering activities (Cáceres 2002). The large amount of burnt bones associated with the hearths and the bone distribution on the occupation floor seem to indicate a close relationship between these archaeological artefacts. Experimental work on bone fractures has showed that heating bones was a strategy for better

obtaining the marrow (Cáceres *et al.* 2002). It has been determined that bone was not used as fuel, but burnt during the butchering process and probably during the cleaning of the occupation area (Rosell 2002, Vaquero and Pastó 2001).

Lithic remains show little variability in the sequence and are characterized by the presence of flint, quartz and limestone. The spatial distribution of these remains and the refitting of stone tools seems to indicate long term sequences of activities (Vaquero 1999).

### Methodology for the phytolith study

For this study we have selected 25 samples, 22 from 9 hearths as well as 3 samples from outside the hearths. Samples are identified as follow: the first part of the name (until the dot) indicates the square where the sample was collected (Fig. 7.2 shows fireplace spatial distribution). The second part of the name indicates the internal layer of the hearth where the sample was collected. The samples have two origins; one group comes from initial soil micromorphology samples, where only the half of each the sample was impregnated and used for the micromorphology study. In this way we have been able to “re-excavate” the other half of the sample. The



Fig. 7.2: Spatial distribution of hearths at level J from the Abric Romani.

other group comes from sediment samples stored in plastic bags and collected during the field works. In Table 7.1 the origin and description of the samples is detailed.

The methodology for phytolith extraction and counting follows Albert (1999). Due to the low number of phytoliths in the sediments we had to use, when possible, large samples of at least 10 grams. This method uses HCl and HNO<sub>3</sub> to remove the carbonates and the phosphates respectively. We use hydrogen peroxide to remove organic material. We dry and weigh the samples after every treatment to know the mass of carbonates and organic material that are lost in every treatment. We have calculated that the margin of error for this method and does not exceed 2%. These results are useful for understanding the hearth features. The classification method for the phytoliths mainly follows Albert (1999), but we added some other typologies. This is because in our case phytoliths with clear cellular origin were mostly coming from grasses, while phytoliths described with geometric forms probably come mainly from wood and bark (Albert 1999). This division permits us to make inferences on the fuelwood used in the fireplaces.

FTIR (Prospect IR Midac software GRAM5-386TM) analyses were made before and while the samples were processed for the phytolith extraction. The amount of sediment needed to do the pH analyses did not allow us to use the same samples that we used for phytolith analyses. However, we especially collected new samples in the east profile for this purpose. The samples were distributed vertically following the three sublevels (Jsup, Ja, Jb) and horizontally inside the shelter (O square 50 y), in the limit of the shelter (N squares layer), and outside the shelter (K square 0 y). Two series of pH analysis were conducted with a pHmeter GLP21, the first one using water and the second using KCl (Lotti 1986).

## Results

All the samples have yielded identical results for the FTIR analysis. Untreated samples always have a pure calcite spectrum, while the Acid Insoluble Fraction (AIF) shows mostly quartz and clay (Fig. 7.3). AIF samples also present NaNO<sub>3</sub>, but this is due to the use of nitric acid during the extraction. No phosphates were detected apart from sample S42 where we detected the polystyrene used to consolidate the sample in the field.

pH analysis shows a consistently high alkalinity with values between eight and nine (Table 7.2), which could be a problem for phytolith preservation (Schiegel *et al.* 1996). But in level J the sedimentation processes of the occupation occurred in a dry environment. The FTIR and pH results indicate a good preservation of the mineral fraction but a less good phytolith preservation. The weathered forms are high in number, however the phytolith assemblages from Abric Romaní are still significant.

All the samples contain a type of phytolith that usually

comes from wood and bark (Albert 1999) (Table 7.3). In the same level charcoal and pollen analyses showed a great predominance of *Pinus*. It is possible that most of these wood and bark phytoliths originated from *Pinus* wood used as fuel. The high number of platelets also suggests the presence of pine needles. The small reference collection that we made with *Pinus sylvestris* confirms the presence of this sort of phytolith in dry needles of this species.

Long and short cells, bulliform cells and trichomes from grasses have been identified. Short cells are grouped together. The only clear subfamilies identified through the short cells were Chloridoids and the Festucoids. Two phytolith forms have been identified as typical Cyperaceae forms (Ollendorf 1992) and also the presence of diatoms has been detected. However, the number of phytoliths with palaeoecological significance is extremely low to give any clear indication of the palaeoclimate. A tentative interpretation of the results suggests a dry climate with forest and grass formation. In addition, it must be remembered that probably most of the phytoliths are of anthropogenic origin (fuel for the fireplaces).

The combination of the phytolith number and the percentages of carbonates, organic material, AIF present in the samples and the frequency of diatoms (Table 7.4 and Fig. 7.4) have allowed us to determine at least four types of combustion structures of which the simple fireplace is the basic structure. A fire where fuel was burned and afterwards the remains were buried without being affected characterizes a simple fireplace. This structure could be also called primary cultural microsedimentary organization (Wattez 1990). We have also observed two constants that happen in the case of simple fireplace structure. The first constant is related to the loss of mass by chemical treatment. In this case the percentage of carbonates decreases from the base to the top of the structure, while the organic remains and the AIF show an inverse relationship. The second constant is related to the phytolith number, which increases from the base to the top. The first constant has been named vertical constant of masses and the second one vertical constant of phytolith number (Fig. 7.4). Utilizing these constants together with the above-mentioned variables, we identify the four types of structures related to fire. However, these constants are only valid for the Abric Romaní site because the special conditions of sedimentation.

The first type, as described above, is called simple fireplace structure and is marked by the two constants (vertical constant of masses and vertical constant of phytolith number).

The second case is named structure with a continuous input of fuelwood or structure with displaced sediment. This type of structure does not display any of the constants because the differences between the layers of the same structure are minimal, resulting in homogeneity in the number of phytoliths and mass loss values between the layers of these fireplaces. The results of the soil

Sample	Lithology	Color	Thermal alteration	Origin	Observations
N49.1	Fine sand	White/Yellow	Absent	SM	
N49.3	Graves with fine sand	Gray	Present	SM	
N49.4	Fine sand	Brown/Gray	Present	SM	Analyzed together with N49.5
N49.5	Medium sand	White/Yellow	Absent	SM	Analyzed together with N49.4
N52.1	Fine sand and fine gravels	Gray	Present	SM	
N52.2	Fine sand with heterometric gravels	Pale gray	Present	SM	
N52.3	Very fine sand	Gray/Black	Present	SM	Thin layer, analyzed with N52.1 and 2
O50.1	Sand and gravels	Yellow	Absent	SM	
O50.2	Fine sand	Brown	Present	SM	
O50.3	Fine sand to clay	Gray/Black	Present	SM	
O50.4	Sand and fine gravels	Brown/Gray	Present	SS	Correlated with O50.2-3
O50.5	(mix of O50.1, O50.2 & O50.3)			SM	
O48.1	Silt and fine sand	Brown/Gray	Present	SS	
O49.1	Sand and gravels	Yellow	Absent	SM*	
O49.2	Sand and gravels	Yellow/Gray	Absent	SM*	
O49.3	Fine sand	Yellow/Gray	Absent	SM*	
O51.1	Fine sand, silt and gravels	Brown/Gray	Present	SS	
O43.1	Fine sand, silt and gravels	Brown/Gray	Present	SS	
O43.2	Silt and fine sand	Brown	Present	SS	
Q50.1	Sand and gravels	Yellow/Brown	Present	SM	
Q50.2	Very fine sand and very fine gravels	Gray/Black	Present	SM	
Q50.3	Fine sand and gravels	Matrix White, gravels black/gray	Absent/Present	SM	
S42.1	Sand with gravels	Gray/Yellow	Absent/Present	SM	
S42.2	Sand	Yellow	Absent	SM	Analyzed together with S42.3
S42.3	Sand	Brown	Present	SM	Analyzed together with S42.2
S42.4	Sand	Black	Present	SM	
U53.2-3	Silt and fine sand	Brown	Present	SS	

Table 7.1: Sample list and sediment characteristics for the Abric Romani Site.

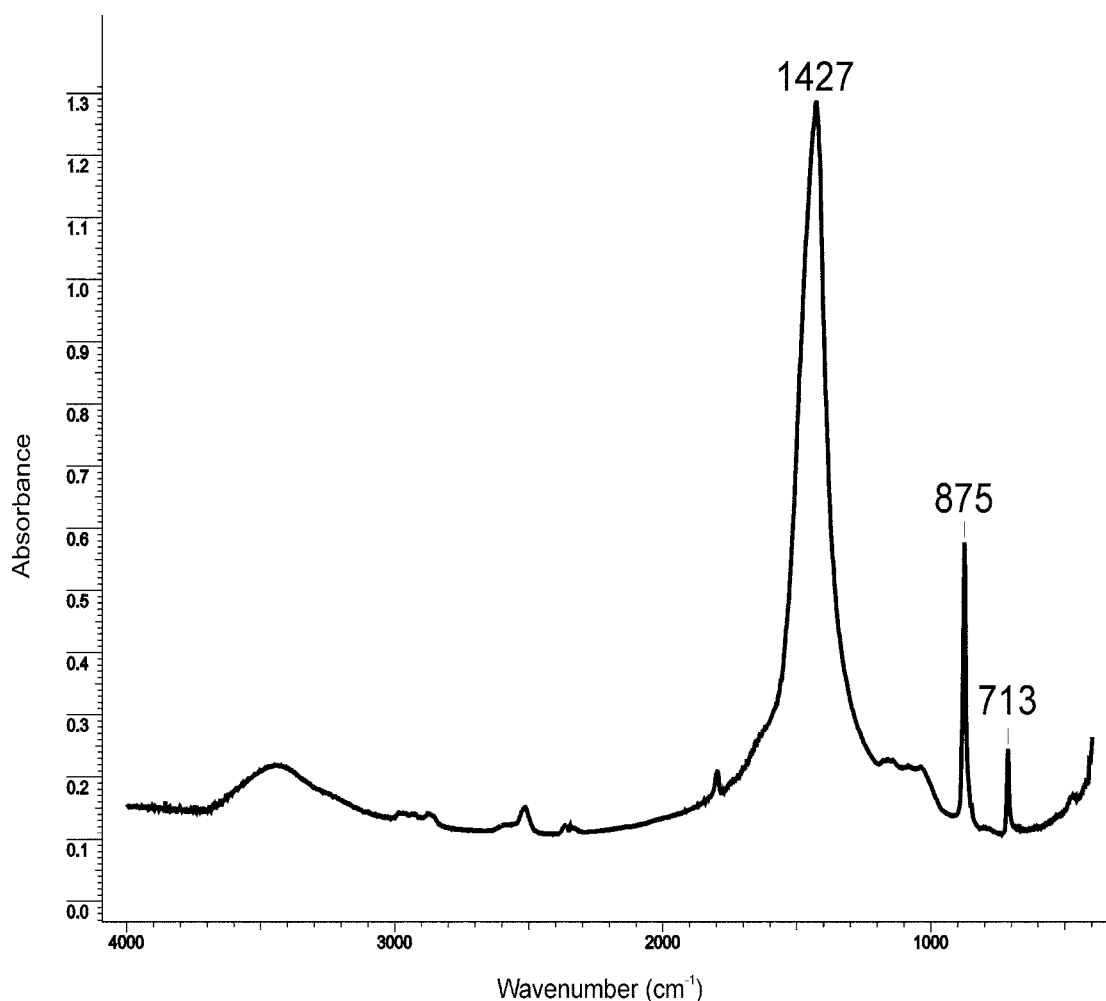


Fig. 7.3: FTIR spectra showing the presence of calcite, sample O50.3. All the samples have reported a very pure calcite in the initial analysis.

Samples	H <sub>2</sub> O	KCl
Jsup O	8.68	8.92
Jsup N	8.52	8.59
Jsup K	8.52	8.51
Ja O	8.76	8.98
Ja N	8.33	8.57
Ja K	8.75	8.95
Jb O	8.76	8.87
Jb N	8.84	8.87
Jb K	8.8	8.73

Table 7.2: Results from the pH analysis.

micromorphology analysis for the same fireplaces are more consistent with displaced sediment than with a continuous input of fuelwood.

The third case is called structure with differential inputs of fuelwood. The phytoliths are concentrated at the base and the top of the structure, while in the center there is a considerable decrease in number of phytoliths.

We only found one case of this sort of structure, and it shows an inversed constant of mass loss.

The last case is called simple fireplace structure with washing or weathering in the final phase (top of the structure). This case shows the continuous loss of mass. However, the number of phytoliths decreases in the top of the structure. At the same time this final phase exhibits more diatoms and grass phytoliths than the lower part of the same structure or than other structures, probably showing the beginning of a soil development. This kind of structure could be combined with the other three structures, showing the complexity of the recorded formation processes.

The main fuel used in the fireplaces from level J is wood and bark. However there are some exceptions. Previously we have hypothesized the possibility of soil formation. In this case we expect an increase of diatoms and grasses. We computed the percentage values of both in an X-Y graph (Fig. 7.5), which shows that in one case there is an increase of both elements, which could then be

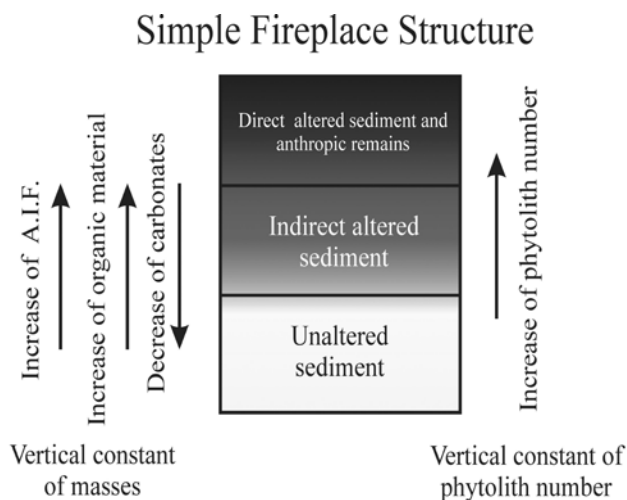


Fig. 7.4: Constants detected in a simple fireplace structure.

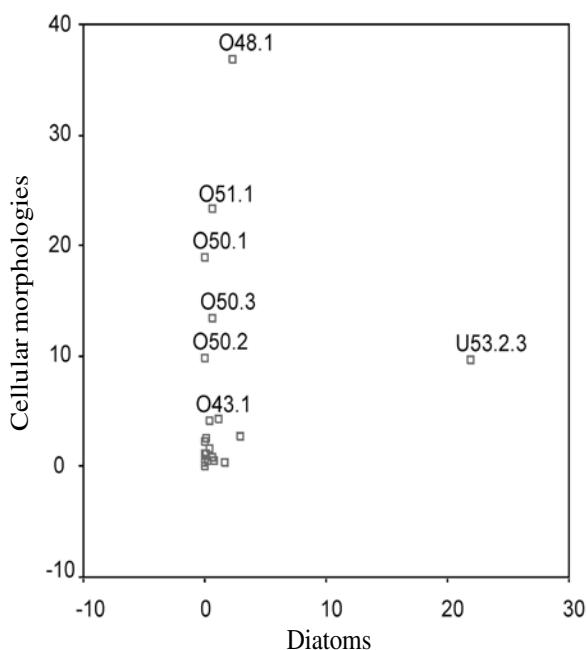


Fig. 7.5: X-Y graphic showing the percentages of cellular morphologies and diatoms.

attributed to a soil formation. But there are some cases with the lower percentage of diatoms but with high levels of grasses. We think that this grass input could have an anthropogenic origin, because in all the other samples, including the samples that do not represent fireplaces, the proportion of phytolith from grasses and phytoliths from wood and bark are similar. It can be also argued that grass phytoliths can be attached to the fuelwood used by the hominids (Albert 1999), but there is no way to explain the huge differences between the samples. In addition, the morphology and the location of these samples containing more grass phytoliths are consistent with the

anthropogenic origin of phytoliths from grasses. These fireplaces are, in some cases, small fireplaces (around 25 cm in diameter compared to others that are at least larger than 50 cm). In other cases these fireplaces are hearths delimited by rocks, while the usual situation is flat fireplaces without surrounding rocks. All the hearths with a considerable presence of grasses are situated in the “drop” zone or in the zone of multiactivities defined by Vallverdú (Vallverdú 2002). These results seem to show that the inhabitants of the cave transported the grass to the site and that grass played a role in the fire technology.

Finally we must remark that in the group of samples



Sample	Phytolith # in 1gr of AIF	# phytolith morphotypes identified	% Carbonates	% Organic Material	% AIF
N49.1	21653	18	85.84	5.23	8.93
N49.3	4575	23	90.83	0.79	8.38
N49.4-5	33925	21	91.72	0.91	7.38
N52.1	137669	25	92.83	1.27	5.91
N52.2	109479	30	84.53	3.36	12.11
N52.1-2-3	97941	26	89.86	1.75	8.39
O43.1	142056	27	85.43	3.62	10.95
O43.2	350736	30	88.13	2.29	9.58
O48.1	5736	28	89.44	2.37	8.19
O49.1	69889	28	95.54	0.01	4.45
O49.2	175734	27	89.87	2.18	7.95
O49.3	75899	26	95.67	0.29	4.04
O50.1	1144	12	87.07	2.37	10.56
O50.2	35362	20	86.62	2.77	10.61
O50.3	52252	24	82.06	4.11	13.83
O51.1	56470	32	89.59	1.00	9.40
Q50.1	300496	24	97.51	0.18	2.31
Q50.2	86568	27	96.05	0.39	3.57
Q50.3	550810	27	96.14	0.45	3.41
S42.1	16470	14	92.20	2.08	5.72
S42.2-3	57567	13	90.21	4.15	5.64
S42.4	124575	19	84.41	5.95	9.64
U53.2-3	11246	21	96.54	1.11	2.35

Table 7.4: Phytolith variables and chemical characteristics for the Abric Romani Site samples.

that do not represent fireplaces there is a presence of wood and bark phytoliths in the level that corresponds to the occupation floor. One explanation could be the dispersion of the ashes and combustion residues caused by the circulation of the hominids, like in the case of the !kung san campsites (Brooks and Yellen 1987).

### Conclusions

The study shows how the combination of different analyses and techniques (e.g FTIR, pH, and calculation of mass loss by chemical treatment) together with a qualitative and quantitative approach could give good results without a significant increase of laboratory time. FTIR requires small quantities of sediment and little time to perform, while pH measurements require more sediment, but the time spent is also low. The advantage of calculating the main compounds sediments is clear because you can do it easily while you are doing the phytolith extraction.

The constants detected in the case of a simple hearth can help to understand the characteristics of the hearths present in a site, however, at the moment, these character-

istics can only be applied in sites with the same characteristics as the Abric Romani. More work, including experimentation, needs to be conducted to apply these techniques to other sites. In addition, the study also demonstrates the importance of a multidisciplinary approach to understanding the behavior and environment of the Middle Paleolithic hunter-gatherers, and how the complexity in fire technology could reveal a more complex behaviour of these groups.

### Acknowledgements

This work was supported by a project DGICYT BXX2000-C03-3 from the Spanish Government. Ethel Allué and Josep Vallverdú acknowledge a grant from *Fundación Atapuerca* and Dan Cabanes from the *Ministerio de Educación, Ciencia y Deporte*. For the Abric Romani, we would like to thank the financial support of *Arts Gràfiques Romanyà-Valls S.A.* and to the *Ajuntament de Capellades*. We would like to extend our thanks to Rosa Maria Albert and Linda Scott Cummings for their comments and to *Totlout* and *Totgraduat* for their support.

## Bibliography

- Albert, R. M. (2000). "Study of Ash Layers through Phytolith Analyses from the Middle Palaeolithic Levels of Kebara and Tabun Caves." Ph.D. Universitat de Barcelona.
- Allué, E. (2002). "Dinámica de la vegetación y explotación del combustible leñoso durante el Pleistoceno Superior y el Holoceno del Noreste de la Península Ibérica a partir del análisis antracológico." Ph. D. Dissertation Universitat Rovira i Virgili.
- Arteaga, I., Allué, E., Pastó, I., Vallverdú, J., and Carbonell, E. (2001). Els fogars del Paleolític Mitjà de l'Abric Romani (Capellades, Anoia). *CYPSELA* **13**, 9-29.
- Bischoff, J. L., Julià, R., and Mora, R. (1988). Uranium-series dating of the Mousterian occupation at Abric Romani, Spain. *Nature* **322**, 68-70.
- Brooks, A. S., and Yellen, J. E. (1987). The Preservation of Activity Areas in the Archaeological Record: Ethnoarchaeological and Archaeological Work in Northwest Ngamiland, Botswana. In "Method and Theory for Activity Area Research." (S. Kent, Ed.). Columbia University Press, New York.
- Burjachs, F., and Julià, R. (1994). Abrupt Climatic Changes during the Last Glaciation Based on Pollen Analysis of the Abric Romani, Catalonia, Spain. *Quaternary Research* **42**, 308-315.
- Cabanes, D. (2002). "Estudi dels fitòlits de sílici en les estructures de combustió del nivell J de l'Abric Romani (Capellades, l'Anoia)." Master thesis, Universitat Rovira i Virgili.
- Cáceres, I. (2002). "Tafonomia de Yacimientos Antrópicos en Karst: Complejo Galería (Sierra de Atapuerca, Burgos), Vanguard Cave (Gibraltar) y Abric Romani (Capellades, Barcelona)." Ph. D. Dissertation, Universitat Rovira i Virgili.
- Cáceres, I., Bravo, P., Esteban, M., Expósito, I., and Saladié, P. (2002). Fresh and heated bones breakage. An experimental approach. In "Current topics on taphonomy and fossilization." (M. de Renzi, M. V. Pardo, M. Belinchón, E. Peñalver, P. Montoya, and A. Marquez-Aliaga, Eds.), pp. 471-480. Col·lecció Encontres. Ajuntament de València, València.
- Carbonell, E. (editor) (2002). Abric Romani Nivell I. Models d'ocupació de curta durada de fa 46.000 anys a la Cinglera del Capelló (Capellades, Anoia, Barcelona), pp. 323. Universitat Rovira i Virgili, Tarragona.
- Carbonell, E., Cebrià, A., et al (1996). Behavioural and organizational complexity in the Middle Paleolithic from the Abric Romani. In "The last Neanderthals/The first anatomically modern humans. A tale about human diversity." (E. Carbonell, and M. Vaquero, Eds.), pp. 385-434. Universitat Rovira i Virgili, Tarragona.
- Lotti, G. (1986). "Análisis químico agrario." Alhambra, Madrid.
- Ollendorf, A. L. (1992). Toward a Classification Scheme of Sedge (Cyperaceae) Phytoliths. In "Phytolith Systematics. Emerging Issues." (J. George Rapp, and S. C. Mulholland, Eds.), pp. 91-111. Advances in Archaeological and Museum Science. Plenum Press, New York - London.
- Pastó, I., Allué, E., and Vallverdú, J. (2000). Mousterian Hearths at Abric Romani, Catalonia (Spain). In "Neanderthals on the Edge." (C. B. Stringer, R. N. E. Barton, and J. C. Finlayson, Eds.), pp. 59-67. Oxbow books, Oxford.
- Rosell, J. (2002). "Patrons d'aprofitament de les biomasses animals durant el Pleistocè inferior i mig (Sierra de Atapuerca, Burgos) i Superior (Abric Romani, Barcelona)." Ph. D. Dissertation Universitat Rovira i Virgili.
- Schiegel, S., Golberg, P., Bar-Yosef, O., and Weiner, S. (1996). Ash Deposits in Hayonim and Kebara Caves, Israel: Macroscopic, Microscopic and Mineralogical Observations, and their Archeological Implications. *Journal of Archaeological Science* **23**, 763-781.
- Vallverdú, J. (2002). "Micromorfología de las facies sedimentarias de la Sierra de Atapuerca y del nivel J del Abric Romani. Implicaciones geoarqueológicas y paleoetnográficas." Ph. D. Dissertation, Universitat Rovira i Virgili.
- Vaquero, M. (1999). Intrasite spatial organization of lithic productions in the Middle Palaeolithic: the evidence of the Abric Romani (Capellades, Spain). *Antiquity* **73**, **281**, 493-504.
- Vaquero, M., and Pastó, I. (2001). The Definition of Spatial Units in Middle Paleolithic Sites: The Hearth-Related Assemblages. *Journal of Archaeological Science* **28**, 1209-1220.
- Wattez, J. (1990). "Dynamique de Formation des Structures de Combustion de la Fin du Paléolithique au Néolithique Moyen." Thèse de Nouveau Doctorat, Université de Paris I.



## **6. La Cueva de El Mirador**

**111**

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI

L'ESTUDI DELS PROCESSOS DE FORMACIÓ DELS SEDIMENTS ARQUEOLÒGICS

I DELS PALEOSÒLS A PARTIR DE L'ANÀLISI DELS FITÒLITS , ELS MINERALS I ALTRES MICRORESTES

Dan Cabanes i Cruelles

ISBN:978-84-692-1535-7/DL-T-378-2009

**6.1. Formation processes through  
archaeobotanical remains: The case of the  
Bronze Age levels in El Mirador cave, Sierra de  
Atapuerca, Spain**

113

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI

L'ESTUDI DELS PROCESSOS DE FORMACIÓ DELS SEDIMENTS ARQUEOLÒGICS

I DELS PALEOSÒLS A PARTIR DE L'ANÀLISI DELS FITÒLITS , ELS MINERALS I ALTRES MICRORESTES

Dan Cabanes i Cruelles

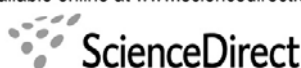
ISBN:978-84-692-1535-7/DL-T-378-2009

ARTICLE IN PRESS

Available online at [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)



ELSEVIER



Quaternary International ■■■■■ ■■■■■ ■■■■■



## Formation processes through archaeobotanical remains: The case of the Bronze Age levels in El Mirador cave, Sierra de Atapuerca, Spain

D. Cabanes<sup>a,\*</sup>, F. Burjachs<sup>a,b</sup>, I. Expósito<sup>a</sup>, A. Rodríguez<sup>a</sup>, E. Allué<sup>a</sup>, I. Euba<sup>c</sup>, J.M. Vergès<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Institut Català de Paleocologia Humana i Evolució Social (IPHES)—Àrea de Prehistòria, Universitat Rovira i Virgili, Pl. Imperial Tàrraco, 1, 43005 Tarragona, Spain

<sup>b</sup>Catalan Institution for Research and Advanced Studies ICREA, Spain

<sup>c</sup>Institut Català d'Arqueologia Clàssica (ICAC), Pl. Rovellat s/n 43003, Tarragona, Spain

### Abstract

El Mirador site has a sequence formed by burnt dung resulting from pastoral activities during the Bronze Age and the Neolithic period. Because there is a high sediment variation in the profile, facies descriptions were used to guide the archaeologists in their work. Paleobotanical and mineralogical analyses were used to describe and understand the formation of the facies from the MIR 4 level. Furthermore, the paleobotanical results serve to reconstruct the landscape in Atapuerca during the Bronze Age.

Most seeds recovered are from *Triticum aestivum/durum*, but other cereals and also Leguminosae and fruits have been identified. Charcoal analysis has yielded mainly deciduous and evergreen *Quercus*. Pollen analysis has revealed a low arboreal cover, with *Pinus*, *Quercus* and riverside trees. Most of the pollen record corresponds to herbs, such as Poaceae and Asteraceae. All these results indicate a mosaic of different biota with forest, pastureland and cultivated fields near the site.

Most of the phytoliths come from the leaves and stems of festucoid grasses. However, there are some differences in the phytolith type and number, the amount of faecal spherulites, the mineralogical composition and the percentage of multicellular structures that indicate that not all the facies in the site have been formed in the same way. Thus, the work carried out has demonstrated that some facies are related more to agricultural activities than to pastoralism activities, and that other facies have been affected by incipient diagenetic processes.

© 2007 Elsevier Ltd and INQUA. All rights reserved.

### 1. Introduction

During the Neolithic and the Bronze Age, caves were frequently used as pens in the European Mediterranean area (Brochier et al., 1992; Boschian, 1997; Macphail et al., 1997; Bergadà, 1998; Badal, 1999; Boschian and Montagnari-Kokelj, 2000; Alday et al., 2003; Karkanas, 2006; Thiébaud, 2006). Frequently these caves contain stratigraphic sequences formed by alternating burnt dung layers, called *fumiers* (French) and “burnt layers” in English, and non-burnt dung layers. The objective of burning the dung was to eliminate the parasites existing in the cave due to livestock penning, or to reduce the volume of accumulated dung (Brochier et al., 1992). As a consequence of these periodic burning events, the texture and the color

variability of the sediment forming the Holocene infilling of the cave increase dramatically. This is probably because not all the sediment-dung of the cave has suffered the same combustion intensity, or even because some sediments and dung have not been burned. In addition, the existence of phosphates in the fresh dung and the liquid waste increases diagenesis of the previously deposited and burned sediments (Macphail et al., 1997; Shahack-Gross et al., 2003; Karkanas, 2006).

This is the case in the El Mirador cave site in the Iberian Peninsula. The cave is located on the southern slope of the Sierra de Atapuerca, near Burgos (Fig. 1), and forms part of the karstic system of the Sierra, which has reported sites with human occupations from the Lower Pleistocene to the present (Rodríguez et al., 2001). In the Mirador site a test pit of 6 m<sup>2</sup> has been investigated since 1999. The aim of the test pit was to collect archaeological and paleoenvironmental data to construct the reference sequence for the site.

\*Corresponding author. Tel.: +34977 558649; fax: +34977 559597.  
E-mail address: [dcabanes@prehistoria.urv.cat](mailto:dcabanes@prehistoria.urv.cat) (D. Cabanes).

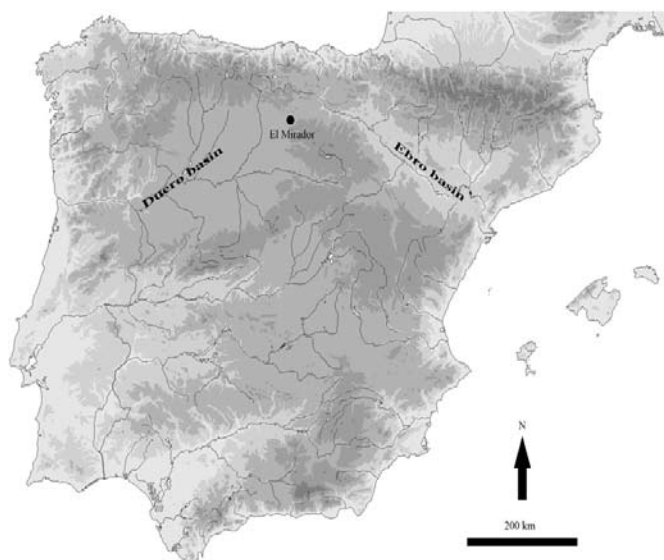


Fig. 1. Map showing the location of the site and the main river basins in the north of the Iberian Peninsula.

Table 1

Results for the dated charcoal with  $C^{14}$  AMS in the level MIR 4

Archaeological level	Material	Taxon	Laboratory number	Measured Radiocarbon Age	Conventional Radiocarbon Age	2 Sigma calibrated result BP	2 Sigma calibrated result BC	$^{13}C/^{12}C$ ratio
MIR 4 (top level)	Charcoal	<i>Quercus</i> sp. (evergreen)	Beta-154894	$3020 \pm 40$	$3040 \pm 40$	3350–3140	1400–1190	–23.9‰
MIR 4 (base level)	Charcoal	<i>Quercus</i> sp. (deciduous)	Beta-153366	$3380 \pm 40$	$3400 \pm 40$	3720–3560	1760–1610	–23.8‰

116

The test has allowed description of a sequence that extends from the Late Upper Pleistocene to the Holocene. The uppermost layers of the sequence, MIR 3A and MIR 4, correspond to the Late and Middle Bronze Age, respectively, and the MIR 6 layer downwards the layers were formed during the Neolithic period. The MIR 5 layer represents an abandonment phase of the site. From the MIR 50 layer downwards the sequence enters in the Pleistocene and the origin of the sediments changes.

The purpose of this work is to characterize the facies identified in the MIR 4 level through the archaeobotanical remains, mainly phytoliths, but also through the pollen, charcoal and seeds, and through the bulk mineral composition of the samples. In addition, the aim of the investigation is to better understand the formation processes and diagenesis of the site and to reconstruct the landscape and human activities in the Sierra de Atapuerca during the Bronze Age.

## 2. MIR 4 level: archaeological remains and facies identified

The MIR 4 level has been dated using  $^{14}C$  AMS on two wood charcoals from evergreen *Quercus* sp., one from the base and the other from the top of the level (Table 1)

(Vergès et al., 2002). A secondary burial of six individuals has been recovered at this level. The human remains reveal evidence relating to gastronomic cannibalism (Cáceres et al., 2007).

The faunal remains principally correspond to domestic animals. The most common species are sheep and goat, but cattle, pigs, and to a lesser degree, horses and dogs are present. Five percent of the total faunal remains recovered correspond to non-domestic animals, namely rabbits, deer and wild boars. Most of this faunal spectrum relates to pastoralism (Vergès et al., 2002). The stone tools are scarce and the main raw material used was flint. Quartzite and limestone cobbles, correlated with hammerstones, pestles and anvils were found in the MIR 4 level. The retouched tools are mainly denticulate, and some of them are associated with sickle elements.

The pottery is scarce and has a high degree of fragmentation. They are simple forms, with decorations that indicate relationships with the Ebro and Duero basins. In addition, there is a small amount of excised decorated pottery linked to the Duffaits group from central western France (Moral et al., 2003). The MIR 3A level has yielded a small bronze axe of the original French Medocaine style (Vergès et al., 2002). The archaeological remains for the

ARTICLE IN PRESS

D. Cabanes et al. / Quaternary International ■ (■■■) ■■-■■■

3

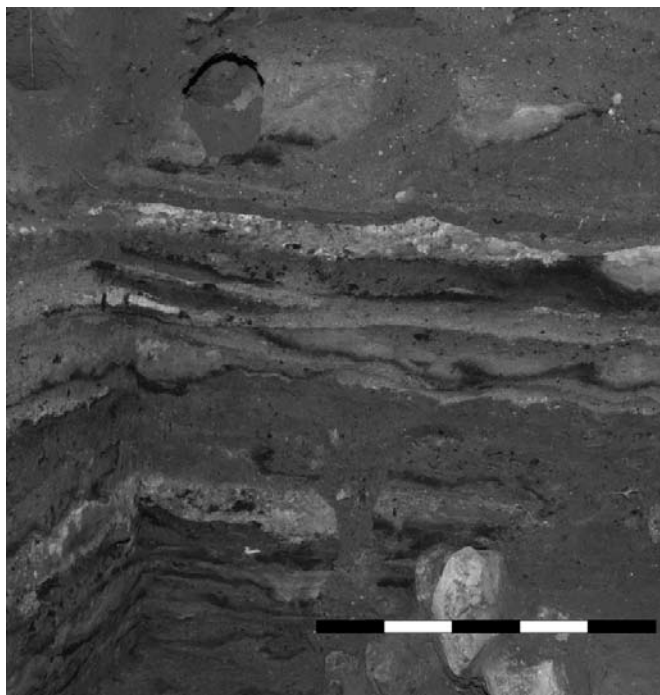


Fig. 2. Picture showing the south profile of El Mirador site. The picture shows the variability of the *facies* from the level MIR 4 to the level MIR 11. The scale is 50 cm.

MIR 4 level indicate trans-Pyrenean contacts and also the strategic position of the site between the two main basins of northern Spain (Fig. 1).

Because of the previously mentioned formation conditions, in the course of the excavation of El Mirador site, “*facies*” description was used to differentiate the variation in the sediments of the same archaeological layer. This procedure was applied in all the archaeological layers to identify a described type of sediment. The *facies* are recurrent in all the sequence and can appear more than once in the same layer (Fig. 2). These *facies* forms rhythmic sequences, normally discontinuous and with abrupt limits, and they are organized horizontally or with a slight inclination to the N or W of the cave. Table 2 presents the description of the *facies* used by the archaeologists in the field.

### 3. Materials and methods

All the sediment extracted from the MIR 4 level was washed and floated using a flotation machine, to recover the seeds and charcoal. The volume floated was almost 2000l (Tables 3 and 4). For charcoal analyses a fraction of 4mm was used. For the carpological analyses the entire residue was studied. *Facies* differentiation was not used during this procedure, but the samples were separated by depth at 10 cm intervals.

For charcoal identification the remains were fragmented by hand in order to obtain three wood anatomy sections,

which makes it possible to describe the cell structure. Charcoal fragments were observed through a metallographic microscope with reflected light (Olympus BX-41) with dark and light fields, using  $\times 50$ ,  $\times 200$ , and  $\times 500$  magnifications. Identification was supported with a reference collection and various wood anatomy atlases (Schweingruber, 1990; Hather, 2000). Seeds were observed with a CETI Steddy-T binocular microscope, at  $\times 10$  and  $\times 40$  magnifications. The identification was supported with a reference collection and seed identification atlases (Bertsch, 1941; Beijerinck, 1947; Villarias, 2000).

For the pollen and phytolith analyses, samples were extracted from the different *facies* that forms the MIR4 level (Table 2). *Facies b* was sampled in duplicate for comparison between the same *facies* in different spots (samples 10 and 13). For the phytolith analyses, two control samples were collected, one from the surface of the site and another from a modern soil in front of the site.

The pollen samples were treated using the Goeury and Beaulieu (1979) technique, which was slightly modified in accordance with Girard and Renault-Miskovsky (1969), and based on the protocol developed by Burjachs et al. (2003). The paleoecological interpretation is based on the average of the 14 samples analyzed. Calculation of AP/NAP percentages excluded from the basic sums all the palynofacies taxa, as well as the Asteraceae, *Cerealia*-type and fern spores. These have a specific pollinization system and/or are favoured by anthropic activity. The pollen

117

## ARTICLE IN PRESS

4

D. Cabanes et al. / Quaternary International ■ (■■■■) ■■■-■■■

Table 2

Description of the *facies* used by the archaeologist during the fieldwork

Facies name	Facies description
facies a	Pale yellow silty clay, with variable amount of rock fragments (limestone fragments, subangular and heterometric). It has an elevated porosity, with a high presence of organic material and common biological activity. It contains dispersed ashes and microcharcoals between the matrix. It is the most common <i>facies</i> and the other <i>facies</i> appear between this <i>facies</i>
facies b	Ashes (practically pure), silty appearance, white in color, with charcoals of variable size, massive and occasionally with thin laminations. It can contain small and dispersed yellow stains. It is a product of combustion in an oxidizing environment, substantially in situ
facies bg	Ashes with features between the <i>facies b</i> and <i>facies g</i> . Result of combustion in an oxidizing environment, substantially in situ
facies c	Accumulations of vegetal charcoal fragments of variable size (millimetric to centimetric). Result of combustion in situ in a reducing environment
facies d	Black organic material with a clotted structure, formed by moderately decomposed animal dung (coprolites), sometimes joined to each other
facies f	Thin ash lenses, white or very pale grey in color, with vegetal fibre structures. It displays a sub-horizontal inclination and a sub-perpendicular pattern. It is the product of the oxidizing combustion of vegetal material on the surface
facies g	Silt sediment, pale grey, massive with abundant dispersed ash in the matrix. Result of oxidizing combustion, mainly in situ
facies i	Greenish silt with abundant dispersed ashes
facies m	Pale brown ash accumulations, compact (sometimes granular), with poor resistance. It contains millimetric charcoals and fragments of reddened sediment dispersed in the matrix. It is the product of combustion in situ and the accumulation of successive combustion residues
facies o	Organic material accumulations, black and homogeneous, without structure or recognizable excrement to the naked eye
-r	Any of the former <i>facies</i> but with evidence of reddening caused by thermal alteration

concentration (PC) was calculated using the volumetric method (Loublier, 1978).

The phytolith extraction was carried out using the methods proposed by Albert (2000) and Madella et al. (1998). About 1 mg of dried residue was mounted on a slide using New Entellan from Merk for phytolith analyses. Wherever possible, the terms used to describe phytolith morphologies follow the terms of the international code for phytolith nomenclature (Madella et al., 2005). The calculation of the phytolith number was done following Albert and Weiner (2001). The phytolith number calculation is based on the acid insoluble fraction (AIF), which is the fraction of the sample that remains after the carbonates, phosphates and organic material have been removed, and wherever phytoliths are present. Using the AIF allows comparisons between samples independently of the diagenesis suffered by the sediment (Albert et al., 1999, 2000, 2003; Karkanis et al., 2000; Albert and Weiner, 2001). Additional counting of the multicellular structures was performed using the entire slide surface. For the

calculation of the faecal spherulites and calcium oxalate druses number, about 1 mg of the dried initial sample was mounted on a slide. Phytoliths, spherulites and calcium oxalates were examined using an Olympus BX41 microscope with polarized light for spherulites and calcium oxalates identification.

During the phytolith extraction the volume lost during the acid and peroxide treatment was measured. This was carried out by weighing the initial sample, and weighing the dried residue of the sample after the acid or peroxide treatment. Although these measures are not as exact as the measurements obtained by other well-defined procedures, they provide useful information about the volume of carbonates/phosphates and organic material present in the samples.

The bulk mineral composition of each *facies* was determined using a Jasco 680 plus FTIR spectrometer. The spectra were collected at a resolution of  $4\text{ cm}^{-1}$  and approximately 1 mg of the original sample was mixed up using an agate mortar with 80 mg of KBr.

## 4. Results

### 4.1. Charcoal

The results from the MIR4 level show up to 15 different taxa (Table 3). The most significant in relation to their percentage representation are deciduous and evergreen oaks (*Quercus* sp. deciduous; *Quercus* sp. evergreen). Other taxa are present in very low percentages, with ash (*Fraxinus*), pomes type (*Maloideae*) and elder (*Sambucus*) the most abundant. The difference in the percentages among the most important taxa and the rest is indicative of a direction in the exploitation of certain resources: firstly, because of their abundance in the environment and secondly, because of the availability and quality of oaks. The identified taxa belong to different biota, indicating the exploitation of different environments, with priority to the most abundant and extensive. Although deciduous oaks cannot be classified into different species by anatomical observation, it is assumed that there were at least two species: *Quercus pyrenaica* and *Quercus faginea*. At present both species grow near the cave. The distribution of *Q. pyrenaica* type would be related to the acidic soils developed at the terraces, whereas evergreen oaks and *Q. faginea* type grew on the calcareous soils of the Sierra. Some of the other taxa, such as *Fraxinus*, *Corylus*, *Cornus*, *Sambucus* and *Salix*, with greater water needs, probably spread near the river or closer water sources. *Pinus sylvestris* type and *Fagus sylvatica* were probably distributed in higher altitudes at the Sierra de la Demanda.

### 4.2. Seeds

For the MIR4 level the majority of the crops and weeds are represented by 18 taxa (Table 4). Most of these remains were charred seeds, and only two spikelet forks were



## ARTICLE IN PRESS

D. Cabanes et al. / Quaternary International ■■■■ ■■■■

5

Table 3

Taxa identified through the charcoal analysis in the MIR4 level

Depth (cm)	1190–1200	1200–1210	1210–1220	1220–1230	1230–1240	1240–1250	1250–1260	1260–1270	1270–1280	Total	%
Volume floated (l)	103.5	226	127	213.9	174	218	278	234.5	303	1877.9	
<i>Cornus</i>		1							1	2	0.18
<i>Corylus avellana</i>		3	1		3	3	2		2	14	1.25
<i>Fagus sylvatica</i>									2	2	0.18
<i>Fraxinus</i>			2	4	4	3	5	3	2	23	2.06
<i>Hedera</i>			1							1	0.09
Fabaceae				1	2	2		1	1	7	0.63
<i>Lonicera</i>								1		1	0.09
Maloideae		5	6	5	2	2	11	3	2	36	3.22
<i>Pinus sylvestris</i> type	1	2			1		1	1		6	0.54
<i>Prunus</i>				1	1	1	8	1		12	1.07
<i>Quercus</i>		1	1	5	5	2	3	1	2	20	1.79
<i>Quercus</i> sp. deciduous	14	90	81	62	91	115	60	56	57	626	55.99
<i>Quercus</i> sp. evergreen	15	33	18	23	29	26	51	51	55	301	26.92
<i>Rhamnus</i>			1							1	0.09
<i>Salix</i>		3							1	4	0.36
<i>Sambucus</i>		2	4	3	11	4	1	1		26	2.33
cf. <i>Betula</i>		1								1	0.09
cf. <i>Hedera</i>	1									1	0.09
cf. <i>Prunus</i>			1	1				1		3	0.27
cf. Maloideae			1		1					2	0.18
cf. <i>Sambucus</i>		1	1							2	0.18
Undetermined		1	2	5		1		1	2	12	1.07
Undetermined		2	3		2	2	3	3		15	1.34
Total	30	144	125	110	152	161	145	124	127	1118	100

recovered during the analysis. The seeds come mostly from cultivated plants, namely cereals and pulses. Two wheat species (*Triticum aestivum/durum* and *Triticum dicocum*) account for more than the 50% of the recovered seeds. *Hordeum vulgare nudum* has also appeared at the site but in smaller quantities. Cultivated pulses are only represented by *Pisum sativum*, representing less than the 2% of the total remains. *Avena* sp. and *Vicia* sp. are also identified. These plants were cultivated in more recent periods, but here are computed as weeds because they lack the main morphological features that ensure they have been cultivated (Alonso, 1999; Arnanz, 2000). Weeds have higher taxa variability than the cultivated plants. Note that the most abundant weed is the *Trifolium* sp., which relates to ovicaprine alimentation (Abdel-Monein and Abd-Alla, 1999). Other plants related to sheep and goat feeding are the *Medicago* sp. and *Melilotus* sp., which appear in smaller quantities in the MIR4 level.

#### 4.3. Pollen

Pollen analysis has provided high values of palynological concentration and taxonomic diversity, which is unusual for archaeopalynological analyses (Fig. 3). These high values are related not only to pollen rain and pollen sedimentation, but also to animal contributions (dung, dust accumulated in the fur, etc.) and humans (bedding for animals, craftwork with vegetable fibres, etc.) (Burjachs,

1988). Most of the pollen record was formed by Poaceae and Asteraceae, with an anthropic artefact of Cerealia-type in facies *f* (Vuorela, 1973). *Secale* pollen was also detected; this plant forms part of the weeds growing with the wheat and other cereals before its cultivation during Roman-Middle Ages in the Iberian Peninsula (Buxó, 1997). The arboreal cover was low (36% AP) and the most represented trees are deciduous *Quercus*, evergreen *Quercus*, *Pinus* spp. and cf. *Juniperus*. *Tilia* and *Ilex*, included within the deciduous trees in Fig. 3, are both relictual taxa from the Iberian Peninsula. The riverside trees identified were *Corylus*, *Salix*, *Ulmus* and *Alnus*. *Betula*, clearly a mountain taxon, was also identified. Shrubby vegetation was dominated by Cistaceae, *Erica* and *Buxus*. Ferns were also present (monoete and trilete spores, *Ophioglossum*, *Isoetes* and *Polypodium*).

As expected, the pollen concentration was low in the facies with thermal alteration. There was a low concentration of pollen in the facies related in the field with ashes (facies *b*, *bg* and *g*), with charcoal (facies *c*) or with reddened sediments (*ar*, *o-r*, *m-r*). The highest concentration and taxonomy diversity were observed in the sediments with no thermal alteration, for example, facies *d* (identified as dung in the field), *f* (formed by fibres) and facies *i* (plastic clay). The pollen results showed high percentages of Poaceae and Cerealia-type in facies *f* and the highest taxonomical diversity (39 taxa) was found in facies *i* (Fig. 3).

Table 4  
Results of the seed analysis showing the main crops and weeds identified in the MIR 4 level

Depth (cm)	1170-1180	1180-1190	1190-1200	1200-1210	1210-1220	1220-1230	1230-1240	1240-1250	1250-1260	1260-1270	1270-1280	1280-90	Total	%
Volume floated (l)	10.7	17	103.5	226	127	213.9	174	218	278	234.5	303	94	1999.6	
<b>Crops</b>														
<i>Hordeum vulgare nudum</i>			4	4	14	12	3	2	11	9	12		71	2.77
<i>Pisum sativum</i>		1	1	2	6	7	7	8	4		3	2	34	1.33
<i>Triticum aestivum/durum</i>	3	6	28	50	85	119	95	186	132	291	263	81	1339	52.20
<i>Triticum dicoccum</i>		2	10	13	26	23	41	65	32	85	96	17	410	15.98
spikelet forks cf. <i>T. dicoccum</i>										1	1		2	0.08
<i>Triticum</i> sp.			7	7	4	11	17	16	21	10	5	100	91	3.55
Total crops	3	9	43	76	129	171	163	277	200	396	380	100	1947	75.91
<b>Weeds</b>														
<i>Avena</i> sp.			3			2	1	1	1	1	1		10	0.39
<i>Bromus</i> sp.					2	4	8	7	2	5	6	1	35	1.36
<i>Carex</i> sp.		3	2		4	6	9	13	7	8	8	6	66	2.57
<i>Chenopodium album</i>							5	1	1	3	3		10	0.39
<i>Chenopodium</i> sp.					1	2	4	5	2	3	2		15	0.58
<i>Gallium aparine</i>		1	3	1	4	5	4	10	6	7	9		50	1.95
<i>Malva</i> sp.		1	1	2	6	2	2	3	4	7	4		32	1.25
<i>Medicago</i> sp.		1			4	3	4	5	4	4			23	0.90
<i>Melilotus</i> sp.			1	2	4	6	3	1	5	9	7	2	38	1.48
<i>Polygonum convolvulus</i>		1	1			1	1	3	1	4	1		11	0.43
<i>Polygonum</i> sp.					3	4	6	1	2	1			17	0.66
<i>Trifolium</i> sp.			3	15	29	47	22	54	23	34	27	36	290	11.31
<i>Vicia</i> sp.					3	2	5	4	1	2	1	3	21	0.82
Total weeds	0	7	14	20	60	83	70	108	54	85	69	48	618	24.09
TOTAL	3	16	57	96	189	254	233	385	254	481	449	148	2565	100

ARTICLE IN PRESS

D. Cabanes et al. / Quaternary International ■ (■■■■) ■■■-■■■

7

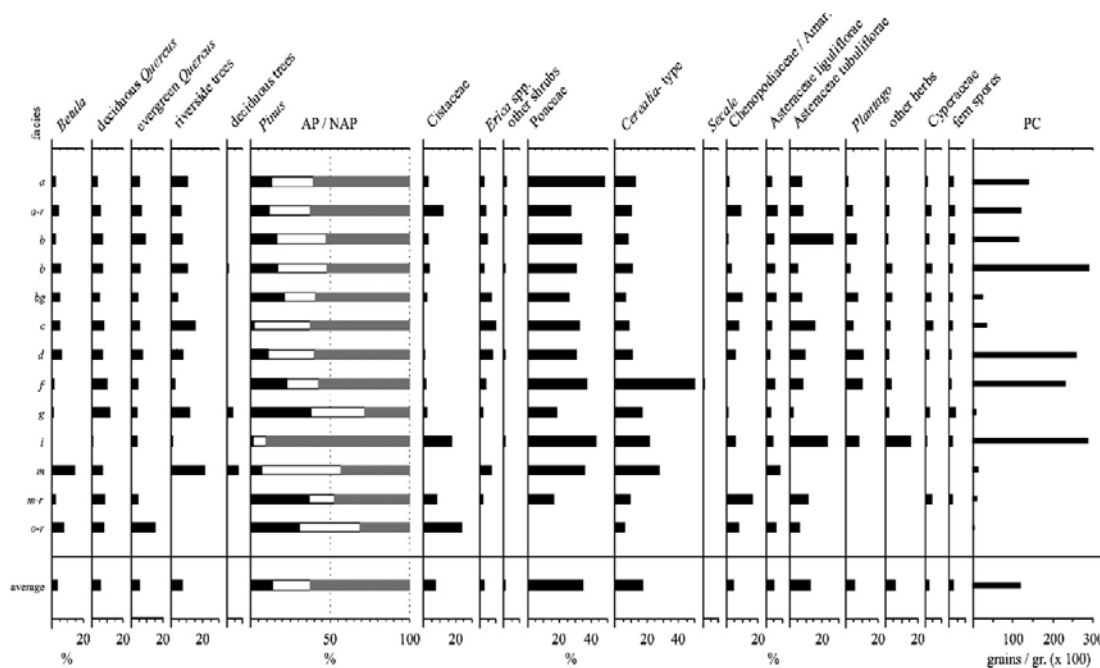


Fig. 3. Diagram showing the results of the pollen analysis for the selected taxa in the MIR 4 level.

Table 5  
 Minerals detected in the samples through the FTIR

Sample	Main mineral 1	Main mineral 2	Presence
facies a	Opal	Calcite	Dahllite
facies a-r	Opal	Calcite	Dahllite
facies b (s10)	Calcite	Opal	Dahllite
facies b (s13)	Calcite	Opal	Dahllite
facies bg	Opal	Calcite	Dahllite
facies c	Calcite	Opal	Dahllite
facies d	Opal	Opal	Dahllite
facies f	Opal	Calcite	-
facies g	Opal	Calcite	Dahllite
facies i	Clay	Calcite	Quartz
facies m	Opal	Calcite	Dahllite
facies m-r	Calcite	Opal	Dahllite
facies o-r	Opal	Calcite	Dahllite
Surface control sample	Calcite	Opal	Dahllite
Modern soil sample	Clay	Calcite	Quartz

The two first columns indicate the main minerals; the position in each column indicates which mineral is most common in the facies. The third column indicates only the presence.

#### 4.4. FTIR and volume of the main components

The main minerals identified through the FTIR in most of the samples are the calcite and the opal from the phytoliths. Dahllite was also present but in smaller quantities (Table 5). Clay and quartz were only identified in the facies i sample and in the modern soil control sample.

Fig. 4 shows the distribution of the carbonates, organic material and AIF in the samples. All the facies have mostly

the same distribution of carbonates, organic material and AIF. In most cases the carbonates are slightly higher than the AIF; in other cases, for example, in facies ar, f and i, the AIF is a little higher than the carbonates. The exceptions are facies b, where the carbonates are more much abundant than in the rest of the samples. Another exception is the modern soil sample which contains much more AIF than carbonates. Note that in all the samples the percentage of organic material is low. The samples with the most organic material are the samples from facies d (identified in the field as a dung accumulation), facies c (identified as charcoal accumulation) and the modern soil control sample.

#### 4.5. Phytoliths, spherulites and calcium oxalate druses

##### 4.5.1. Phytoliths, spherulites and calcium oxalate quantification

The amount of phytolith is high in all the facies, but there are considerable variations between them. The sample with the most phytoliths is the modern soil control sample (Table 6). This is probably because when the modern soil control sample was collected, parts of dried grasses present in the surface were also collected, thus artificially increasing the number of phytoliths. The archaeological sample with the highest concentration of phytoliths per gram of AIF is the sample from facies f. The facies bg, facies a and facies a-r also have a considerable quantity of phytoliths.

The number of spherulites varies in each facies (Table 6). The facies with the most spherulites are facies bg and facies

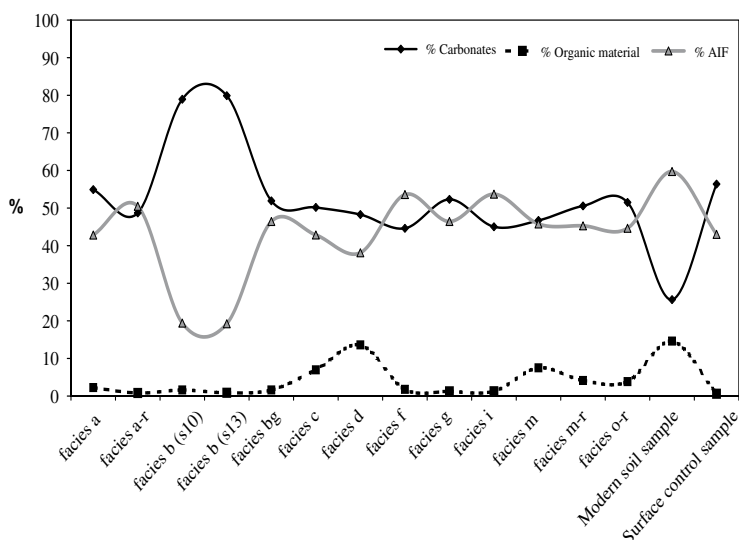


Fig. 4. Distribution of the percentages of carbonates/phosphates, organic material and acid insoluble fraction (AIF) in the different facies.

Table 6

Table showing the estimated number of phytoliths in 1 g of acid insoluble fraction (AIF), the estimated number of faecal spherulites in 1 g of untreated sediments and the estimated number of calcium oxalate druses ( $\text{CaO}_x$ ) in 1 g of untreated sediment

Sample	Phytoliths in 1 g of AIF	Spherulites 1 g sediment	$\text{CaO}_x$ in 1 g of sediment
facies a	9.500.000 ± 1.290.000	4.200 ± 300	550 ± 40
facies a-r	12.900.000 ± 1.700.000	11.700 ± 800	1.130 ± 80
facies b (s10)	3.800.000 ± 402.000	2.200 ± 150	0
facies b (s13)	3.700.000 ± 530.000	2.300 ± 160	0
facies bg	13.600.000 ± 1.390.000	13.600 ± 1400	0
facies c	2.500.000 ± 392.000	5.600 ± 500	720 ± 70
facies d	4.400.000 ± 530.000	3.800 ± 400	330 ± 30
facies f	25.000.000 ± 4.736.000	1.700 ± 200	420 ± 50
facies g	10.000.000 ± 1.270.000	6.700 ± 400	740 ± 50
facies i	4.300.000 ± 676.000	4.700 ± 300	250 ± 20
facies m	5.300.000 ± 1.000.000	3.500 ± 200	350 ± 20
facies m-r	6.900.000 ± 958.000	6.400 ± 400	990 ± 60
facies o-r	3.100.000 ± 278.000	9.200 ± 700	600 ± 50
Surface control sample	5.800.000 ± 530.000	10.500 ± 1000	790 ± 80
Modern soil sample	36.400.000 ± 6.230.000	0	0

ar. The surface control sample (which is probably a mix of the upper archaeological sediments) also has a high amount of spherulites as well as facies o-r. Note that the facies defined as a dung accumulation (facies d) does not have an exceptional amount of spherulites.

Calcium oxalates druses were not observed in the two facies b samples, in the facies bg sample and in the modern soil control sample (Table 6). The facies with the highest amount of calcium oxalates is facies a-r (more than 1000 calcium oxalate druses in 1 g of sediment), followed by facies m-r (close to 1000 in 1 g of sediment).

#### 4.5.2. Phytolith morphologies

Most of the phytoliths identified correspond to monocotyledons. The dicotyledonous phytoliths are poorly

represented. The sample with highest concentration of dicot phytoliths is the facies m-r sample (23%). No phytoliths other than grass phytoliths were found in the monocotyledon group. The phytoliths from the grasses were formed mainly in the leaves and the stems of these plants (Figs. 5 and 6A). The phytoliths from inflorescence are present in lower percentages. The facies with the highest concentration of inflorescence morphotypes are facies f and facies a. More than 96% of the short cells identified in all the facies correspond to festucoid short cells (Fig. 6B). The results for the multicellular structures have shown a dominance of leaves/stem multicellular structures over inflorescence multicells (Figs. 7 and 6C). The exception is the facies f, where there are more inflorescence multicells than leaves/stem multicellular structures. Most

## ARTICLE IN PRESS

D. Cabanes et al. / Quaternary International ■ (■■■) ■■■-■■■

9

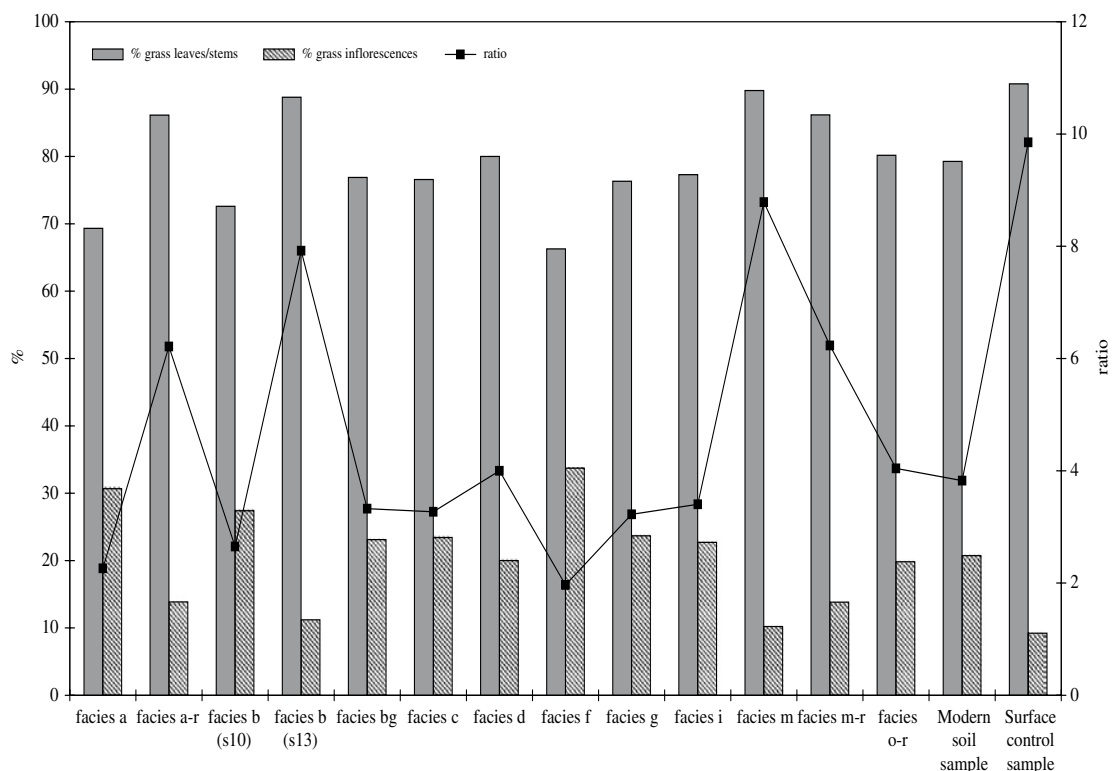


Fig. 5. Anatomical origin of the grass phytoliths identified in the samples.

of the inflorescence multicellular structures from facies *f* are represented by dendritic morphologies (Fig. 6D).

## 5. Discussion

The origin of El Mirador Holocene sediments is principally the dung from the animals kept in the cave during the Bronze Age. This hypothesis is not only supported by the archaeological remains but also by the archaeobotanical remains and the mineralogical composition of the sediments. The phytoliths from the facies of the Bronze Age come mainly from the leaves and stems of the grasses. Such grasses were probably part of the diet of these animals or their bedding. Thus, the existence of calcium oxalates, which could originate in the dicotyledonous leaves (Franceschi and Horner, 1980; Prychid and Rudall, 1999), must be related to the foddering or bedding of the animals enclosed in the cave (Rasmussen, 1993). Most of the species from the charcoal record can be used to fodder animals. Oak and ash are especially preferred by cattle. The relation between the percentages of the most abundant woody taxa, evergreen and deciduous oaks, and the rest of the taxa, indicates that there was a strategy to exploit these species. The wood fodder was usually exploited during the winter seasons when grazing was not possible. This strategy has been documented in other archaeological sites and recorded ethnographically (Haas et al., 1988; Rasmussen,

1993; Karg, 1998). The presence of faecal spherulites in all the samples is a clear indicator of the dung deposition in the cave (Brochier et al., 1992; Canti, 1997, 1999). The mineralogical composition shows the presence of dahllite, which could be indicative of a relatively high phosphate level in the sediments. These phosphates could come from fresh dung (Macphail et al., 1997; Shahack-Gross et al., 2003; Karkanas, 2006).

However, not all the facies are the product of burned dung. The results for facies *f* indicate that this facies is more related to the crop-processing residues than to dung accumulation (Vuorela, 1973; Macphail et al., 1997; Harvey and Fuller, 2005). Some spherulites, as well as calcium oxalates, have been detected in this facies, but the origin of those elements should be related to the difficulty in sampling this facies, which is formed by very fine fibres surrounded by the other facies. The high presence of husk phytoliths indicates that the crop-processing stage could be the threshing/winoning or the milling/pounding (Harvey and Fuller, 2005). Storage areas also should contain husk phytoliths, but no evidence of storage structures has been detected during the excavation of the MIR 4 layer. Most of the inflorescence phytoliths found are dendritic morphologies that might be related to the presence of husk of *Triticum aestivum/durum*, whose seeds have been recovered from the same archaeological layer. Nevertheless, morphometrical analysis of the dendritic phytoliths must be carried

## ARTICLE IN PRESS

10

D. Cabanes et al. / Quaternary International ■ (■■■■) ■■■-■■■

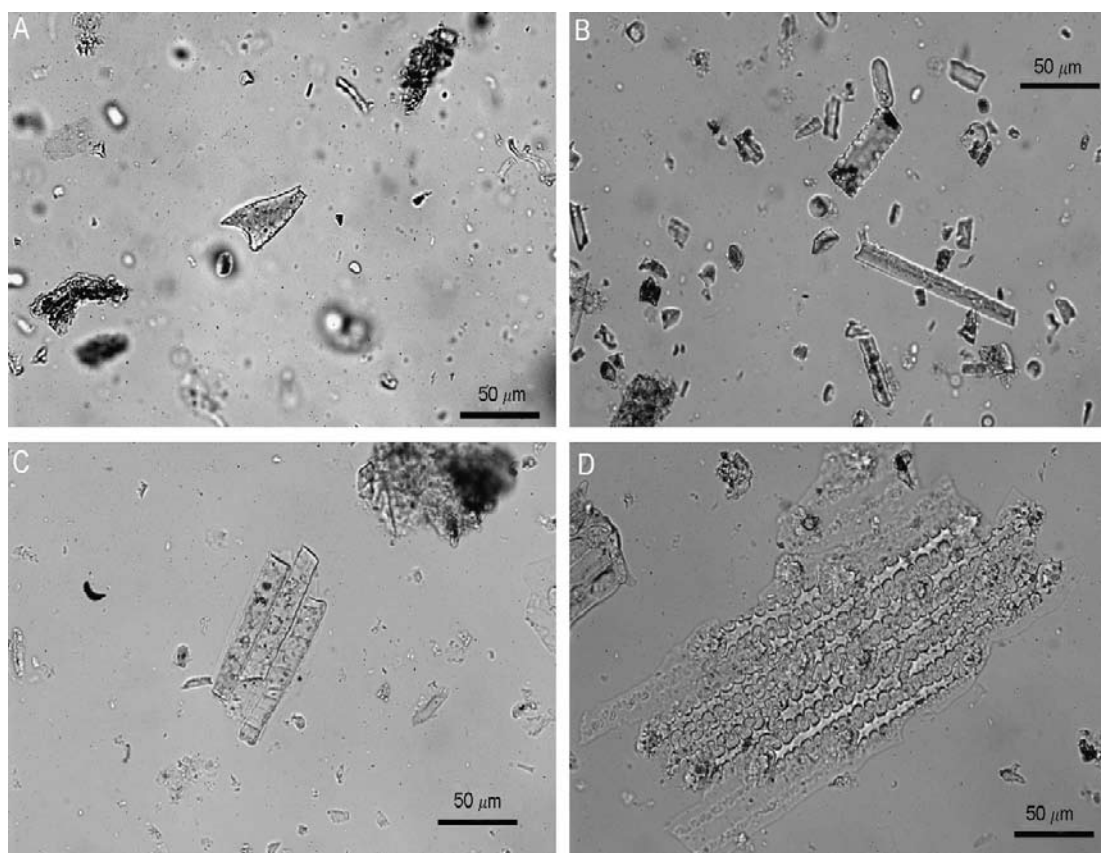


Fig. 6. Microphotographs from the phytoliths identified in the MIR 4 level: (A) Prickle from a monocot leaf, *facies a*. (B) Festucoid short cells (rondels) together with psilate long cells, *facies a*. (C) Multicellular structure formed by psilate long cells from the leaves/stem of grass, *facies f*. (D) Multicellular structure formed by dendritic long cells from the grass inflorescence, *facies f*.

124

out to confirm this hypothesis (Ball et al., 1999, 2001). The destination of the final product of the crop-processing can be the human consumption or the foddering of livestock present in the cave. The discrimination of grain for human consumption or grain for animal foddering at a minimum is complicated (Jones, 1998). Nevertheless, Karkanas (2006) has proposed the use of cereal inflorescence for animal foddering. Feeding animals with cereal grains destined for human consumption is an expensive practice, even if there are few animals, and only possible when the surplus of grain is considerable. In this sense, prior to the mechanization of agriculture, the cultivation of fodder was labour-intensive (Halstead, 1996). Nevertheless, the question arises whether the whole inflorescence (including the grains) was used to feed the animals or only the husk was used as fodder.

The different characteristics of *facies i* indicate that the origin of this *facies* is a mix of dung and clay, from outside the cave, not related to the general context deposition for the MIR 4 level. The FTIR results for *facies i* are very similar to the results from the soil control sample. In addition, the pollen record of *facies i* presents similarities to a soil pollen spectrum (Bottema, 1975). Note that the pollen deposited in the dung can be biased by the

alimentary preferences of the animals (Carrión et al., 2000) or, in the case of the Mirador site, by the burning of the dung. Consequently, the diversity of the pollen record formed by the mix of dung and clay, from outside the cave, should be higher than the diversity of most of the pollen samples from el Mirador site, which are formed mainly by burned dung. Moreover, the presence of clay for preparing floors and carrying out other activities has been detected in many caves where animal dung was also burned (Karkanas, 2006, personal observation in the Portalón Cave, Sierra de Atapuerca).

The type and amount of phytoliths from the reddened *facies* do not show major differences to the same *facies* type without this feature. However, the calcium oxalates concentration is higher in the reddened *facies* than in the not reddened *facies* of the same type, and there is a slight increase in the dicot phytolith percentage in these types of *facies*. The calcium oxalates and the dicot phytoliths could indicate a differentiated combustion processes in terms of fuel for the reddened *facies*.

Wood ash is the probable origin of the two samples from the *facies b*. However, there is not a significant increase in wood and bark phytoliths in these samples. Note that

ARTICLE IN PRESS

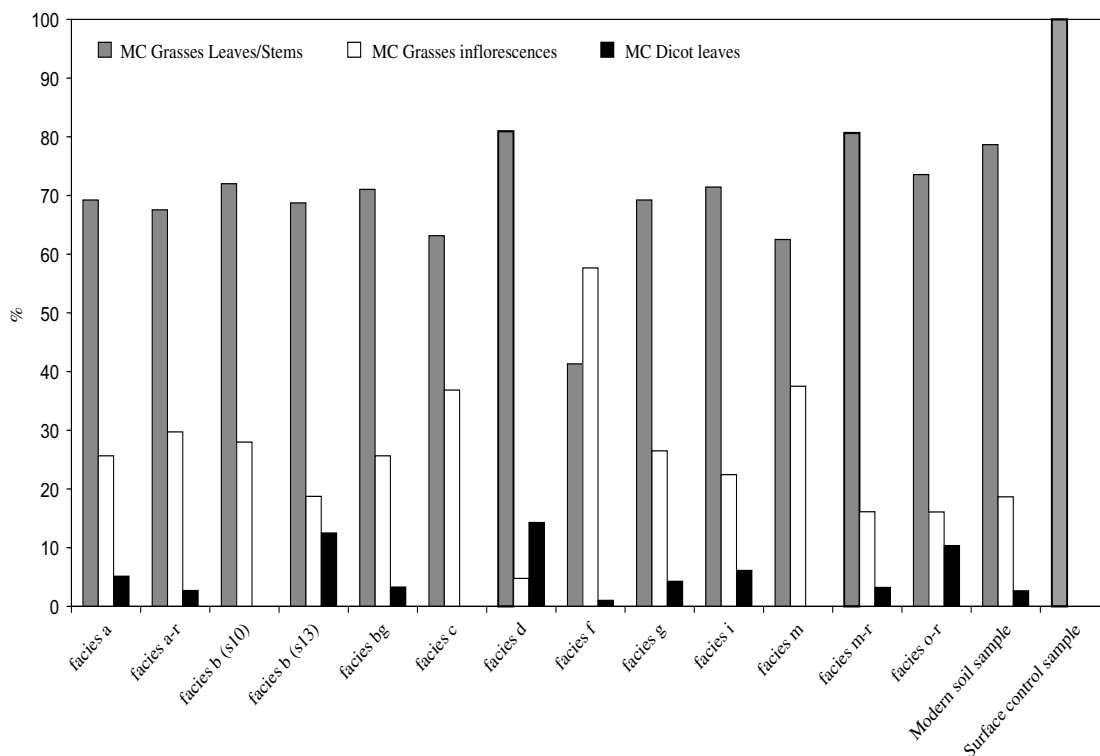


Fig. 7. Origin of the multicellular structures identified in the MIR 4 level.

grasses can produce 20 times more phytoliths than wood and bark and that part of the phytolith contained in the wood and bark used as fuelwood can contain grass phytoliths in form of “contamination” (Albert, 2000). Most of the sediment contained in facies *b* probably has its origin in wood ashes, but also the contribution from other sources (i.e. dung) needs to be taken into account, because the faecal spherulites have lower concentrations than in other samples but they are still present in facies *b*. In comparison with the samples from facies *b*, the samples from facies *g* and *bg* show larger quantities of phytoliths and spherulites. This can be explained by the presence of more burnt dung in the facies *g* and *bg* samples than in the facies *b* samples, and can also be explained by a different depositional event in these facies.

Finally, a good correlation exists between the amount of multicellular structures and the amount of spherulites (Fig. 8). When no other indicators discard the presence of dung in the samples (i.e. in facies *f*, facies *i* and probably facies *b*), the low presence of multicellular structures and spherulites could indicate the reworking of these sediments. The hypothesis is that the reworking processes disaggregate the existing multicellular structures converting these into regular phytoliths, and increase the solubility of the faecal spherulites, which seem to be formed by a relatively unstable form of calcium carbonate (Shahack-Gross et al., 2003). Furthermore, good preservation of the multicellular structures and the spherulites could indicate the human

import of plants to the cave for bedding the animals (Macphail et al., 1997). Facies *a-r* and the surface control sample do not follow this correlation. These samples, especially the sample from the facies *ar*, are relatively rich in calcium oxalates. Lower number of phytoliths and a sediment rich in calcium oxalate remains has been related to foddering animals with hay leaves (Macphail et al., 1997). This could explain why there is a considerable quantity of faecal spherulites in the sediment but fewer multicellular structures from grasses. The soil micromorphological analysis, which is still in progress, will help to confirm or reject this hypothesis.

According to the results obtained through the seed, charcoal, pollen and phytolith analyses, the archaeobotanical record was formed by human activities related to agriculture and pastoralism. Charcoal analyses show that the landscape was at least partially formed by arboreal cover which, due to the intensive exploitation, clearly shows a transformation that favoured the development of open environments with more open shrubby vegetation. The results of the pollen analysis show similar conditions. The landscape is a mosaic of different biota: oak forest with evergreen and deciduous elements, mountain range vegetation, riverside species and cultivated cereals. This mosaic can be summarized into three types of vegetal cover: the forest, the pastureland and cultivated fields. The climate during the formation of level MIR 4 was similar to the current continental Mediterranean climate (Rivas,

## ARTICLE IN PRESS

12

D. Cabanes et al. / Quaternary International ■ (■■■■) ■■■-■■■

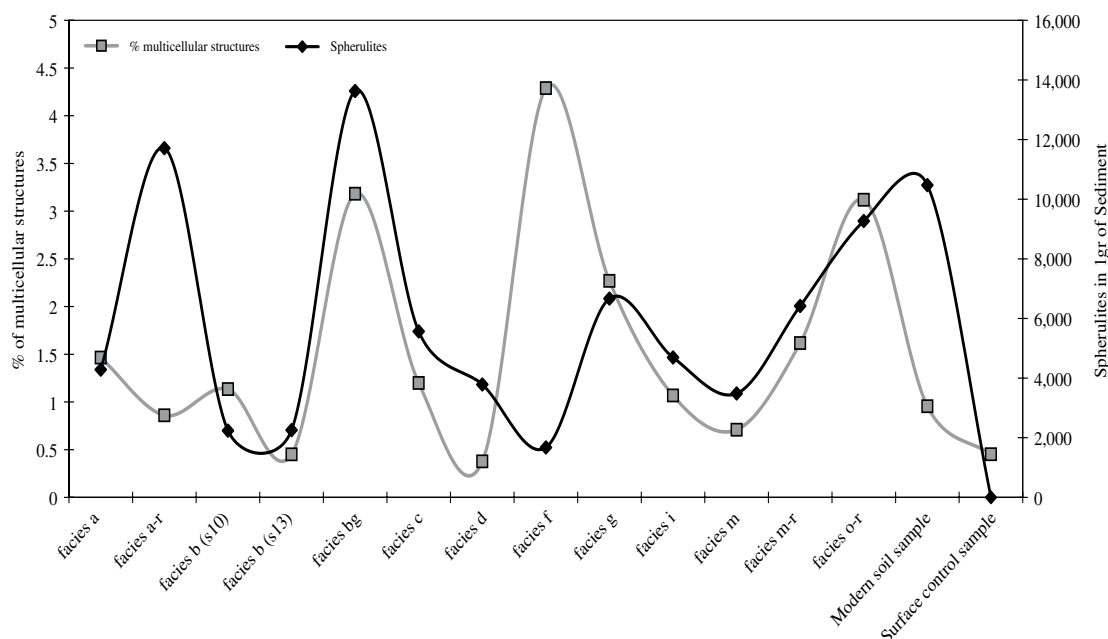


Fig. 8. Comparison of the amount of multicellular structures and the amount of faecal spherulites in the facies studied.

1987), but with some Atlantic influences (i.e. *Quercus* sp. deciduous and *Fagus*). Moreover, some of the taxa identified by pollen and charcoal analyses show a higher degree of humidity in the environment.

## 6. Conclusions

Most of the facies variability in the MIR4 level depends on variables such as humidity, duration of the combustion, type of animal dung, etc., which affect the combustion processes of the accumulated dung. Nevertheless, some of the clearest differences are due to the different origins of the sediment, and probably the reworking of those sediments in ancient times. The relationship between single phytoliths, multicellular phytoliths and spherulites can be a clear indicator of postdepositional processes in these types of sediments. The archaeological remains show that the site was used during the Middle Bronze Age as an animal enclosure and a burial site. However, other activities related to crop-processing and agriculture have also been detected through seed, charcoal, pollen, phytolith and mineralogy analyses. Such analyses can be combined to understand the paleoecology of the site. These disciplines are complementary to each other not only to explain the past landscape, but also to increase understanding of formation and diagenetic processes in sites such as El Mirador Cave.

## Acknowledgements

The authors are grateful to the El Mirador team for its help during the fieldwork. We are also grateful for the

comments made during the 6th International Meeting on Phytolith Research. The research and fieldwork is supported by the project *Ecología, biología y comportamiento social y técnico en el pleistoceno y el Holoceno de la sierra de Atapuerca* (BOS2003-08938-C03-03), the Junta de Castilla y León and the Fundación Atapuerca. The research work of Dan Cabanes is supported by a predoctoral grant from the Fundación Atapuerca. The work of Anna Rodríguez is supported by a predoctoral fellowship SGR (2001SGR-00313).

## References

- Abdel-Monein, A.Y., Abd-Alla, M.S., 1999. Feed preference by Baladi goats. *Applied Animal Behaviour Science* 65, 63–72.
- Albert, R.M., 2000. Study of ash layers through Phytolith analyses from the Middle Palaeolithic levels of Kebara and Tabun Caves. Ph.D. Thesis, Universitat de Barcelona, Barcelona.
- Albert, R.M., Weiner, S., 2001. Study of phytolith in prehistoric ash layers from Kebara and Tabun caves using a quantitative approach. In: Meunier, J.D., Colin, F. (Eds.), *Phytolith: Applications in Earth Sciences and Human History*. A.A. Balkema Publishers, Lisse, pp. 251–266.
- Albert, R.M., Lavi, O., Estroff, L., Weiner, S., 1999. Mode of occupation of Tabun Cave, Mt Carmel, Israel during the Mousterian Period: a Study of the Sediments and Phytoliths. *Journal of Archaeological Science* 26 (10), 1249–1260.
- Albert, R.M., Weiner, S., Bar-Yosef, O., Meignen, L., 2000. Phytoliths in the Middle Palaeolithic deposits of Kebara Cave, Mt Carmel, Israel: study of the plant materials used for fuel and other purposes. *Journal of Archaeological Science* 27 (10), 931–947.
- Albert, R.M., Bar-Yosef, O., Meignen, L., Weiner, S., 2003. Phytolith and mineralogical study of Herths from the Middle Paleolithic levels of Hayonim cave (Galilee, Israel). *Journal of Archaeological Science* 30 (3), 461–480.



## ARTICLE IN PRESS

D. Cabanes et al. / Quaternary International ■ (■■■■) ■■■-■■■

13

- Alday, A., Fernández, J., Yusta, I., 2003. Suelos de habitación-suelos de corrales: los casos de Atxoste y Los Husos. *Veleia* 20, 183–225.
- Alonso, N., 1999. De la llavor a la farina. Els processos agrícoles protohistòrics a la Catalunya Occidental. *Monographies d'Archéologie Méditerranéenne*, 4, CNRS, Lattes, 328pp.
- Arnanz, A.M., 2000. Las leguminosas del Cerro de la Cruz (Almedinilla, Córdoba). Presencia de *Vicia sativa* L. y *Vicia ervilia* (L) Willd. en un contexto ibérico. *Complutum* 11, 239–243.
- Badal, E., 1999. El potencial pecuario de la vegetación mediterránea: las cuevas redil. *Saguntum-Plav Extra* 2, 69–76.
- Ball, T.B., Gardner, J.S., Anderson, N., 1999. Identifying inflorescence Phytoliths from selected species of wheat (*Triticum monococcum*, *T. dicoccon*, *T. dicoccoides*, and *T. aestivum*) and barley (*Hordeum vulgare* and *H. spontaneum*) (Gramineae). *American Journal of Botany* 86 (11), 1615–1623.
- Ball, T.B., Gardner, J.S., Anderson, N., 2001. An approach to identifying inflorescence phytoliths from selected species of wheat and barley. In: Meunier, J.D., Colin, F. (Eds.), *Phytolith: Applications in Earth Sciences and Human History*. A.A. Balkema Publishers, Lisse, pp. 289–302.
- Beijerinck, W., 1947. *Zadenatlas der Nederlandsche flora: Ten behoeve de botanie, palaeontologie, bodemcultuur en Warenkennis*. H. Veenman & Zonen, Wageningen, 316pp.
- Bergadà, M.M., 1998. Estudio geoarqueológico de los asentamientos prehistóricos del Pleistoceno Superior y el Holoceno inicial en Catalunya. *BAR International Series*, 742, Archaeopress, Oxford, 268pp.
- Bertsch, K., 1941. *Handbucher der praktischen Vorgeschichtsforschung: Früchte und Samen*. Verlag Ferdinand Enke, Stuttgart, 247pp.
- Boschian, G., 1997. Sedimentology and soil micromorphology of the late Pleistocene and early Holocene deposits of Grotta dell'Edera (Trieste Karst, NE Italy). *Geoarchaeology* 12 (3), 227–249.
- Boschian, G., Montagnari-Kokelj, E., 2000. Prehistoric shepherds and caves in the Trieste Karst (Northeastern Italy). *Geoarchaeology* 15 (4), 331–371.
- Bottema, S., 1975. Interpretation of pollen spectra from prehistoric settlements (with special attention to Liguliflorae). *Palaeohistoria* 17, 17–35.
- Brochier, J.E., Villa, P., Giacomarra, M., Tagliacozzo, A., 1992. Shepherds and sediments—geo-ethnoarchaeology of pastoral sites. *Journal of Anthropological Archaeology* 11 (1), 47–102.
- Burjachs, F., 1988. Anàlisi polínic de los niveles cerámicos de la Cova 120 (Alta Garrotxa, Catalunya). *Acta Salmanticensis* 65, 285–290.
- Burjachs, F., López-Sáez, J.A., Iriarte, M.J., 2003. Metodología arqueopalinológica. In: Buxó, R., Piqué, R. (Eds.), *La recogida de muestras en arqueobotánica: objetivos y propuestas metodológicas*. Museu d'Arqueologia de Catalunya, Barcelona, pp. 11–18.
- Buxó, R., 1997. *Arqueología de las Plantas*. Crítica, Barcelona, 367pp.
- Cáceres, I., Lozano, M., Saladie, P., 2007. Evidence for Bronze Age Cannibalism in El Mirador Cave (Sierra de Atapuerca, Burgos, Spain). *American Journal of Physical Anthropology* 133, 899–917.
- Canti, M.G., 1997. An investigation of microscopic calcareous spherulites from herbivore dung. *Journal of Archaeological Science* 24 (3), 219–231.
- Canti, M.G., 1999. The production and preservation of faecal spherulites: animals, environment and taphonomy. *Journal of Archaeological Science* 26 (3), 251–258.
- Carrion, J.S., Scott, L., Huffman, T., Dreyer, C., 2000. Pollen analysis of Iron Age cow dung in southern Africa. *Vegetation History and Archaeobotany* 9 (4), 239–249.
- Franceschi, V.R., Horner, H.T., 1980. Calcium oxalate crystals in plants. *The Botanical Review* 46, 361–427.
- Girard, M., Renault-Miskovsky, J., 1969. Nouvelles techniques de préparation en Palynologie appliqués à trois sédiments du Quaternaire final de l'Abri Cornille (Istres-Bouches du Rhône). *Bulletin de l'Association Française pour l'Etude du Quaternaire* 4, 275–284.
- Goeury, Cl., de Beaulieu, J.-L., 1979. À propos de la concentration du pollen à l'aide de la liqueur de Thoulet dans les sédiments minéraux. *Pollen et Spores XXI* (1–2), 239–251.
- Haas, J.N., Karg, S., Rasmussen, P., 1988. Beech leaves and twigs used as winter fodder: examples from historic and prehistoric times. *Environmental Archaeology* 1, 81–86.
- Halstead, P., 1996. Pastoralism or household herding? Problems of scale and specialization in early greek animal husbandry. *World Archaeology* 28 (1), 20–42.
- Harvey, E.L., Fuller, D.Q., 2005. Investigating crop processing using phytolith analysis: the example of rice and millets. *Journal of Archaeological Science* 32, 739–752.
- Hather, J.G., 2000. *The Identification of the Northern European Woods: A Guide for Archaeologists and Conservators*. Archetype Publications Ltd., London, 188pp.
- Jones, G., 1998. Distinguishing food from fodder in the archaeobotanical record. *Environmental Archaeology* 1, 95–98.
- Karg, S., 1998. Winter and spring foddering of sheep/goat in the Bronze Age site of Fivè-Carera, Northern Italy. *Environmental Archaeology* 1, 87–94.
- Karkanas, P., 2006. Late Neolithic household activities in marginal areas: the micromorphological evidence from the Kouveleiki caves, Peloponnese, Greece. *Journal of Archaeological Science* 33 (11), 1628–1641.
- Karkanas, P., Bar-Yosef, O., Goldberg, P., Weiner, S., 2000. Diagenesis in prehistoric caves: the use of minerals that form in situ to assess the completeness of the archaeological record. *Journal of Archaeological Science* 27 (10), 915–929.
- Loublier, Y., 1978. Application de l'analyse pollinique à l'étude du paléoenvironnement du remplissage Würmien de la grotte de L'Arbreda (Espagne). Ph.D. Thesis 3th Cycle, Université des Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier, 85pp.
- Macphail, R.I., Courty, M.-A., Hather, J., Watez, J., Ryder, M., Cameron, N., Branch, N.P., 1997. The soil micromorphological evidence of domestic occupation and stabling activities. In: Maggi, R. (Ed.), *Arene Candide: A Functional and Environmental Assessment of the Holocene Sequence (Excavations Bernarbo' Brea-Cardini 1940–50)*. Il Calamo, Roma, pp. 53–88.
- Madella, M., Powers-Jones, A.H., Jones, M.K., 1998. A simple method of extraction of Opal Phytolith from sediments using a non-toxic heavy liquid. *Journal of Archaeological Science* 25 (8), 801–803.
- Madella, M., Alexandre, A., Ball, T., 2005. International code for phytolith nomenclature 1.0. *Annals of Botany* 96 (2), 253–260.
- Moral, S., Rodríguez, J.A., Díez, C., 2003. Las cerámicas de la cueva de El Mirador (Ibeas de Juarros, Burgos) en el contexto del Bronce medio de la sub-Meseta norte. *Boletín del Seminario de Estudios de Arte y Arqueología LXIX–LXX*, 57–74.
- Prychid, C.J., Rudall, P.J., 1999. Calcium oxalate crystals in monocotyledons: a review of their structure and systematics. *Annals of Botany* 84 (6), 725–739.
- Rasmussen, P., 1993. Analysis of goat sheep feces from Egozvil-3, Switzerland—evidence for branch and twig foddering of livestock in the Neolithic. *Journal of Archaeological Science* 20 (5), 479–502.
- Rivas, S., 1987. Memoria del mapa de series de vegetación de España. Instituto para la Conservación de la Naturaleza (ICONA) & Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, Madrid, 267pp.
- Rodríguez, X.P., Carbonell, E., Ortega, A.I., 2001. Historique des découvertes préhistoriques de la Sierra de Atapuerca (Burgos, Espagne) et perspectives du futur. *L'Anthropologie* 105 (1), 3–12.
- Schweingruber, F.H., 1990. *Anatomie europäischer Hölzer: ein Atlas zur Bestimmung europäischer Baum- Strauch- und Zwergstrauchhölzer (Anatomy of European Woods an Atlas for the Identification of European Trees Shrubs and Dwarf Shrubs)*. Verlag P. Haupt, Bern, 800pp.
- Shahack-Gross, R., Marshall, F., Weiner, S., 2003. Geo-ethnoarchaeology of pastoral sites: the identification of livestock enclosures in abandoned Maasai settlements. *Journal of Archaeological Science* 30 (4), 439–459.

127

## ARTICLE IN PRESS

14

*D. Cabanes et al. / Quaternary International ■ (■■■■) ■■■-■■■*

- Thiébault, S., 2006. Wood-anatomical evidence of pollarding in ring porous species: a study to develop? In: Dufraise, A. (Ed.), *Charcoal Analysis: New Analytical Tools and Methods for Archaeology*. BAR International Series 1483, Basel, pp. 95–102.
- Vergès, J.M., Allué, E., Angelucci, D.E., Cebrià, A., Diez, C., Fontanals, M., Manyós, A., Montero, S., Moral, S., Vaquero, M., Zaragoza, J., 2002. La Sierra de Atapuerca durante el Holoceno: Datos preliminares sobre las ocupaciones de la Edad del Bronce en la cueva de El Mirador (Ibeas de Juarros, Burgos). *Trabajos de Prehistoria* 59 (1), 107–126.
- Villarias, J.L., 2000. *Atlas de malas hierbas*. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid, 536pp.
- Vuorela, I., 1973. Relative pollen rain around cultivated fields. *Acta Botanica Fennica* 102, 1–27.

## **7. Tel Dor**

**129**

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI

L'ESTUDI DELS PROCESSOS DE FORMACIÓ DELS SEDIMENTS ARQUEOLÒGICS

I DELS PALEOSÒLS A PARTIR DE L'ANÀLISI DELS FITÒLITS , ELS MINERALS I ALTRES MICRORESTES

Dan Cabanes i Cruelles

ISBN:978-84-692-1535-7/DL-T-378-2009

**7.1. Phytolith-rich layers from the Late Bronze and Iron Ages at Tel Dor (Israel): mode of formation and archaeological significance 131**

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI

L'ESTUDI DELS PROCESSOS DE FORMACIÓ DELS SEDIMENTS ARQUEOLÒGICS

I DELS PALEOSÒLS A PARTIR DE L'ANÀLISI DELS FITÒLITS , ELS MINERALS I ALTRES MICRORESTES

Dan Cabanes i Cruelles

ISBN:978-84-692-1535-7/DL-T-378-2009



## Phytolith-rich layers from the Late Bronze and Iron Ages at Tel Dor (Israel): mode of formation and archaeological significance

Rosa Maria Albert<sup>a,\*</sup>, Ruth Shahack-Gross<sup>b,h</sup>, Dan Cabanes<sup>c</sup>, Ayelet Gilboa<sup>d</sup>,  
Simcha Lev-Yadun<sup>e</sup>, Marta Portillo<sup>a</sup>, Ilan Sharon<sup>f</sup>, Elisabetta Boaretto<sup>b,h</sup>, Steve Weiner<sup>g</sup>

<sup>a</sup> Catalan Institution for Research and Advanced Studies (ICREA)/Research Group for Palaeoecological and Geoarchaeological Studies,  
Department of Prehistory, Ancient History and Archaeology, Universitat de Barcelona, c/ Montalegre, 6-8. 08001 Barcelona, Spain

<sup>b</sup> Kimmel Center for Archaeological Science, Weizmann Institute of Science, Rehovot 76100, Israel

<sup>c</sup> Àrea de Prehistòria, Depart. Geografia i Història, Universitat Rovira i Virgili/IPHES, Plaça Imperial Tàrraco no. 1, 43005 Tarragona, Spain

<sup>d</sup> Zinman Institute of Archaeology, University of Haifa, Mount Carmel, Haifa 31905, Israel

<sup>e</sup> Department of Biology, University of Haifa – Oranim, Tivon 36006, Israel

<sup>f</sup> Institute of Archaeology, The Hebrew University of Jerusalem, Mount Scopus, Jerusalem 91905, Israel

<sup>g</sup> Department of Structural Biology and the Kimmel Center for Archaeological Science, Weizmann Institute of Science, Rehovot 76100, Israel

<sup>h</sup> Department Land of Israel Studies and Archaeology, Bar Ilan University, 52900 Ramat Gan, Israel

Received 8 November 2006; received in revised form 26 January 2007; accepted 25 February 2007

### Abstract

The presence of many phytolith-rich layers in late Bronze and Iron Age deposits at Tel Dor, Israel, are indicative of specific locations where plants were concentrated. Detailed studies of six of these phytolith-rich layers and associated sediments from Tel Dor show that the phytoliths were derived mainly from wild and domestic grasses. The most common domestic grass was the cereal *Triticum aestivum* (bread wheat). Three of these layers have a microlaminated microstructure, associated dung spherulites and phosphate nodules; characteristics that all point to the phytolith-rich layers having formed from dung in animal enclosures. In two of the layers, the microlaminated structure is absent while dung spherulites and phosphate nodules are present, suggesting that these too originate from dung that was not deposited in an enclosure. The sixth layer is microlaminated but does not contain spherulites. We thus cannot suggest a parsimonious explanation of its observed properties. Concentrations of burnt phytoliths are present in three locations, implying that dung was either burnt *in situ* or the ashes from burnt dung were re-deposited. The transformation of dung accumulations into phytolith-rich layers involves a loss of organic material and hence a significant reduction in sediment volume, which is clearly apparent in the stratigraphy of some of the locations examined. The volume reduction can be observed in the macrostratigraphy and has important implications with regard to macrostratigraphic interpretation. The presence of abundant phytolith-rich layers on the *tell* has significant implications for the concept of 'urbanism' during these periods.

© 2007 Elsevier Ltd. All rights reserved.

**Keywords:** Phytoliths; Mineralogy; Dung spherulites; Cereals; Micromorphology; Tel Dor; Iron Age; Urbanism

### 1. Introduction

A systematic study of the sediments from the Late Bronze and Iron Age periods at Tel Dor (Israel) revealed the presence of numerous white layers, whose major component is opaline (siliceous) phytoliths. These layers vary in thickness from millimeters to 30 or so centimeters. They can extend laterally for meters. Shahack-Gross et al. (2005) studied two of these phytolith-rich layers that accumulated within a monumental

\* Corresponding author. Catalan Institution for Research and Advanced Studies (ICREA)/Research Group for Palaeoecological and Geoarchaeological Studies, Department of Prehistory, Ancient History and Archaeology, Universitat de Barcelona, c/ Montalegre, 6-8. 08001 Barcelona, Spain. Tel.: +34 934037525; fax: +34 934037541.

E-mail address: [rosamaria.albert@icrea.es](mailto:rosamaria.albert@icrea.es) (R.M. Albert).

<sup>1</sup> Visiting Scientist at the Weizmann Institute of Science.

building of the early Iron Age above the southern harbor. They cover the entire space investigated (part of either a room or an open courtyard) and vary in thickness from a centimeter or so to about 10 cm. Prior to this study, these layers were thought to be lime-plaster floors. Micromorphological and phytolith analysis showed that they are composed almost entirely of phytoliths from grasses. The sediment microstructure revealed a wavy lamination, indicative of trampling. Calcitic spherulites were also present. These are derived from the digestive tracts of ruminants, including common domestic animals such as goats, sheep and cows (Brochier et al., 1992; Canti, 1997, 1998, 1999). Shahack-Gross et al. (2005) concluded that this space was used at some point in time in the early Iron Age as an animal enclosure. The aim of this study is to compare and contrast six different phytolith-rich layers at Tel Dor in order to better understand the manner in which they formed, their implications to site formation processes and their significance to the archaeology of the site.

As phytoliths do not accumulate as such, but are always deposited together with the associated plant organic material, the presence of these layers raises interesting taphonomic questions. Shahack-Gross et al. (2005) reported that the volume proportions of phytoliths to whole modern dung is about 1:50. The reduction in volume that occurs when the organic matter is degraded is considerable. This compression of *tell* sediment over time, can clearly influence the stratigraphy, can concentrate artifacts into smaller volumes and can juxtapose sediment layers against walls that are lower (i.e. older) than the sediments.

It is reasonable to assume that almost all phytoliths were brought to the *tell* while still an integral part of the plants in which they formed. The organic fraction of the plants then degrades relatively rapidly, and the more stable fraction comprising, in the case of grasses, mainly phytoliths, remains. According to Shahack-Gross et al. (2005) an accumulation of a meter of plants would therefore reduce to about 2 cm. The phytolith-rich layers we have examined also contain other minerals such as quartz and clay. Thus, in general, the volume reduction was probably considerably smaller.

Based on the studies of Shahack-Gross et al., (2003, 2005) there are four main criteria for determining whether or not the phytolith-rich layers are from animal enclosures: microlamination, dung spherulites, authigenic phosphate and the types of phytoliths present.

### 1.1. Ethnoarchaeological background

As the phytolith-rich layers at Tel Dor probably form as a result of plant accumulations degrading or being burnt under domestic or industrial circumstances, one key to understanding this phenomenon is from ethnoarchaeological observations. These are mostly from agro-pastoral societies and unfortunately not from urban contexts that could be more relevant to Tel Dor.

The most comprehensive ethnoarchaeological studies of traditional agro-pastoral societies in the Near East are from western Iran (Kramer, 1982; Watson, 1979) and to some extent from Syria (Kamp, 2000; Roth, 1985) and Ottoman Palestine (Ziadeh-Seely, 1999). Traditional agro-pastoral villages are

basically agglomerates of households (Watson, 1979; Ziadeh-Seely, 1999). Each household consists of an open courtyard and roofed rooms. The rooms are used as the family living room, kitchen, various storage rooms, and as stables for the household's sheep and goats. There are separate stables for cattle, donkeys and horses (Kramer, 1982; Ziadeh-Seely, 1999). Goods stored are grains, straw, and dung cakes. The latter are dried kneaded animal dung formed into flat ovals that are used as fuel (N.F. Miller and P.J. Watson, personal communication; see also Miller, 1984; Reddy, 1998).

Based on the above, accumulations of large quantities of organic materials that could degrade into phytolith-rich layers may occur in abandoned storage rooms (grain and its associated chaff, straw, dung cakes) and in pits, as well as in open areas within and around the site (mostly dung and its ash). As it is unlikely that grain, straw and dung cakes will be left unused, except in cases of abrupt, unplanned, abandonment, the most likely material to form relatively thick phytolith-rich layers of either burnt or un-burnt phytoliths is dung. Note that building with dung today is mostly achieved by mixing dung with mud. This is not expected to form phytolith-rich layers after degradation.

The phytoliths expected to be found in dung of animals maintained by an agro-pastoral society are mainly a mixture of wild and domestic plants. The animals are usually herded away from the site, feeding on wild vegetation, but their diet is supplemented by fodder of both wild and domestic plants. Moreover, it is customary that agro-pastoralists grow plots of plants used as fodder for their animals (e.g., barley in Iran (Watson, 1979); sorghum in India (Reddy, 1997); various legumes and grasses in Palestine (Turkowski, 1969)). In addition, stables are lined with straw, and this is mixed with the dung. The herds often graze on the stubble left in the fields after harvesting the crops. Dung in ethnographic contexts is usually removed from the stables.

Other possible areas of accumulation of plant remains are threshing floors, remains of matting and bedding, roofing of thatch and bark and chaff-tempered mud plaster. Ethnoarchaeological studies emphasize that the straw and chaff (and of course the grains) are collected from the threshing floor (Kramer, 1982; Reddy, 1997; Watson, 1979; Whittaker, 2000). Phytolith layers are therefore not expected to form on threshing floors. This was indeed verified in an ethnoarchaeological study in northern Greece (Tsartsidou et al., in press). Mats and mattresses made of straw would produce thin phytolith layers. Phytolith layers resulting from the decay of woven mats should be composed of phytoliths from reeds or palms; plants known to be used for matting in the Near East. Kramer (1982) also mentions that roofs are lined with reed mats. Upon collapse these may form thin phytolith layers composed of reed phytoliths in a semi-oriented microstructure. Reeds or mats are also occasionally used *inside* mud-brick walls, to bind sections of the wall and/or improve elasticity (Aurenche, 1981). In Uzbekistan straw is placed beneath the roof presumably as insulation (E.B., personal observation). Bark can also be used for roofing (S.W., personal observation, Hunan Province, China). This too would produce a distinctive assemblage of phytoliths and siliceous aggregates (Albert et al., 1999; Albert and Weiner, 2001; Schiegl et al., 1996). Table 1 is a summary of the above data.



Table 1

The phytolith types, presence of spherulites and the microstructure expected to be present in agro-pastoral settlement features, based on ethnographic documentation

Features	Expected phytolith types	Spherulites	Microstructure
Storage rooms			
Straw/hay fodder	D/w, mostly leaf/stem phytoliths	(–)	(?)
Dung cakes	D/W, leaf, stem and inflorescence	(+)	(?)
Grains with chaff	D/w, mostly inflorescence	(–)	(?)
Storage pits (grains)	D/w, mostly inflorescence	(–)	(?)
Open areas (preparation area for dung cakes, livestock paths, etc.)	D/W, leaf, stem and inflorescence	(+)	(?)
Trash heaps (dung and burned dung)	D/W, leaf, stem and inflorescence	(+)	Unoriented <sup>a</sup>
Livestock penning (dung)	D/W, leaf, stem and inflorescence	(+)	Microlaminated <sup>b</sup>
Threshing floors	D/w, leaf, stem and inflorescence	(–?)	(?)
Dung-made installations (chicken coops, hives)	D/W, leaf, stem and inflorescence	(+)	(?)
Matting	W, reed stems, palm leaves	(–)	Thin single layers
Roofing	W/D, wood, grass leaf/stem/inflorescence	(–)	(?)
Bedding	W/D, leaf/stem/inflorescence?	(–)	(?)
Dung plastered floors or walls	D/W, leaf, stem and inflorescence	(+)	Thin separated layers <sup>c</sup>

The features listed are those in which large quantities of organic matter may be present that may degrade into phytolith-rich layers. D/d, phytoliths from domestic cereals; W/w, phytoliths from wild grasses and other wild plants; a capital letter indicates that large amounts are expected and a small letter indicates that small amounts are expected; (+), expected to be present, (–), not expected to be present; (?), empirically unknown.

<sup>a</sup> Based on Shahack-Gross et al. (2004) studying a pastoral Maasai trash pit.

<sup>b</sup> Based on Shahack-Gross et al. (2003) studying pastoral Maasai livestock enclosures and on Macphail et al. (2004).

<sup>c</sup> Based on Shahack-Gross, unpublished data from wall plaster from India and South Africa.

## 1.2. Tel Dor

Dor was a major port town on the eastern Mediterranean coast (Fig. 1). Its earliest occupation dates to the Middle Bronze Age IIA (ca. 2000–1750 BCE) and its *tell* was continuously and intensely settled until the Roman period (c. 250 CE). Until the building of an artificial port with Roman technology in nearby Caesarea, the natural bays south and north of the *tell* were among the few natural anchorage points along the central part of the eastern Mediterranean seaboard, which ensured the existence of a thriving urban center. This role of a commercial entrepôt is most conspicuous in the early Iron Age—one of the periods investigated in this paper. In contrast to the humble insular material culture typical of this ‘Dark Age’ in the Levant (and elsewhere around the Mediterranean), Dor exhibits certain luxuries, some foreign contacts (with Philistia, Cyprus and Egypt, and to a certain extent with Greece), and it displays dense urban architecture as well as monumental public construction. In fact, architecture has been encountered in every excavation area that reached the early Iron Age strata. For more information on Tel Dor, see Gilboa (2005); Gilboa and Sharon (2003) and Sharon and Gilboa (in press) and a full bibliography at <http://www.hum.huji.ac.il/dor/bibliography.htm>.

The study of phytolith-rich layers thus offers an opportunity to learn more about the use of space both within and outside buildings, and more specifically the manner in which vegetal matter and dung were utilized.

## 2. Materials and methods

We investigated six phytolith-rich layers from the Late Bronze–Iron Age sequence of Tel Dor in addition to the two

studied previously from the early Iron Age monumental building (area D2, Shahack-Gross et al., 2005). They are located in the following excavation areas (Fig. 1): two in area G, a series of thin layers in area D5 and three in area D2. Table 2 lists the 32 sediment samples analyzed from these areas. They were collected from freshly exposed surfaces using a spatula and placed in plastic vials. We also studied gray powdery sediments that in two cases are juxtaposed to the phytolith-rich layers. For comparison we sampled brown quartz and clay-rich sediments in layers above and/or below the phytolith-rich layers.

### 2.1. On-site analyses

We used Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) to determine the identities of the major sedimentary minerals. About 0.1 mg of powdered sample was mixed with about 80 mg of KBr, and a pellet was produced using a hand press. FTIR spectra were collected at 4 cm<sup>–1</sup> resolution using a portable Fourier Transform Infrared (FTIR) Spectrometer (MIDAC Corp., Costa Mesa, CA, USA).

In addition, bulk sediment samples were gently homogenized using a mortar and pestle and a grain mount was prepared using Entellan New (Merck) and examined using a petrographic microscope (Nikon, Labophot2-pol).

### 2.2. Phytolith analyses

For each sample, a detailed morphometric, morphologic and quantitative study of the phytoliths was performed to identify the types of plants, as well as the plant parts from which the phytoliths were derived. We also address the complicated question of whether or not the plants were from domesticated or wild sources by comparing morphometric traits of the

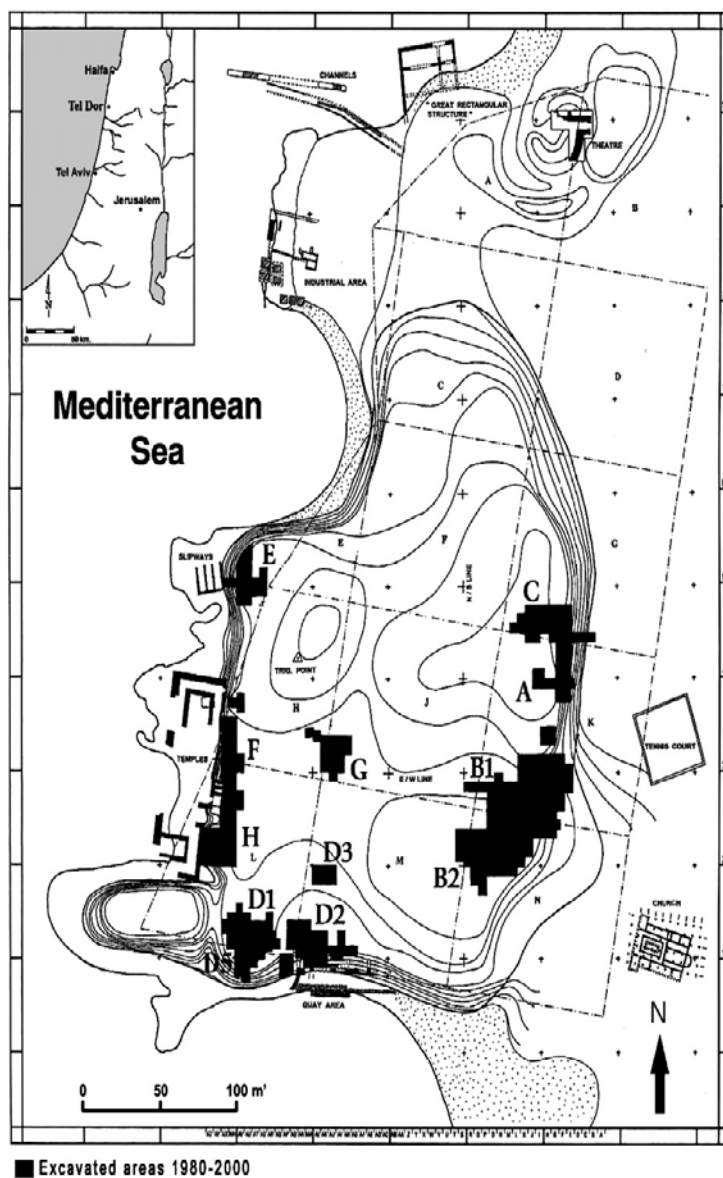


Fig. 1. Map of Tel Dor showing the locations of excavation areas. The current study focuses on six phytolith-rich layers in areas G, D2 and D5. The inset shows the location of Tel Dor on the eastern Mediterranean coast.

phytoliths collected on-site to those of an off-site reference collection.

Quantitative and morphological analyses followed the methods of Albert et al. (1999). Slides were examined using an Olympus BX41 optical microscope and digital images were obtained using an Olympus Camedia C-5060 camera and Olympus DP soft 5.0 software. The number of phytoliths on the slide was counted and related to the original sediment weight. For morphological analysis, a minimum of 200 phytoliths with diagnostic morphologies were counted in order to obtain an error of around  $\pm 20\%$  (Albert, 2000).

Morphological identification of phytoliths was based on standard literature (Brown, 1984; Mulholland and Rapp, 1992; Piperno, 2006; Twiss et al., 1969). When possible, the terms describing phytolith morphologies follow anatomical terminology, and otherwise they describe the geometrical

characteristics of the phytoliths. The International Code for Phytolith Nomenclature was also followed where possible (Madella et al., 2005).

Morphometric analysis of phytoliths is an effective tool for differentiating between phytoliths produced by closely related taxa (Ball et al., 1999; Berlin et al., 2003; Pearsall et al., 1995; Zhao et al., 1998). We used “Motic” image analysis software. Ten parameters (Table 3) were measured for the most distinctive inflorescence phytolith morphotype observed, namely dendritic epidermal long cell phytoliths. Thirty phytoliths were analyzed from each sample. We then conducted discriminant analyses (with SPSS for Windows), using calibration data from the same species, following the methodology of Ball et al. (1999) and Berlin et al. (2003).

We measured the refractive index (RI) of the mineral opal in order to differentiate between burnt and unburnt phytoliths,

Table 2

Sediment samples collected in the six localities studied and the results from their phytolith and spherulite concentrations and major mineral components

Sample number	Area	Phytoliths per 1 g of sediment	Spherulites per 1 g of sediment	Refractive index ratio: above/below 1.440	Phytoliths weathering (%)	Major mineral components	Description
32	G loc. 1	6000000	200000	0.67	9.85	O, Q, Cl, Ca	White-gray layer in between 31 and 3
31	G loc. 1	13000000	700000	0.43	9.09	O, Q, Cl, Ca	White layer above sample 32
3	G loc. 1	24000000	800000	0.72	20.8	Q-O, Cl, Ca	White layer below 32
75	G loc. 2	33000000	–	0.25	12	O, Q, Ca, D?	White sediment, lower layer
76	G loc. 2	21000000	–	0.06	14.3	O, Q, Ca, D?	White sediment, lower layer
77	G loc. 2	46000000	–	0.00	11.2	O, Q, Ca, D?	White sediment, lower layer
78	G loc. 2	2000000	–	0.03	8.4	O, Q, Ca, D?	White sediment, wall between stones
79	G loc. 2	100000	–	0.06	21.4	Q, Cl, Ca	Brown sediment, wall between stones
10	G loc. 2	300000	–	0.00	17	O, Q, Ca	White sediment, upper layer
11	G loc. 2	15000000	–	0.00	10.3	O, Q, Ca	White sediment, lower layer
11	D5	7000000	35000	0.03	13.4	Q, Cl, O, Ca	Whitish layer western wall
7	D5	3000000	80000	5	12	Ca, Cl, Q, Ar	Gray sediment western wall
1	D5	9000000	–	0.11	15.5	Cl, Q, O, Ca	Whitish layer western wall
3	D5	300000	–	0.07	5.6	Cl, Q, Ca	Brown sediment western wall
15	D5	1000000	7000	0.00	10.2	Q, Cl, Ca, O	Brown sediment eastern wall below sample 17
17	D5	1000000	300000	0.03	8	Q, Cl, Ca	Brown sediment with Spherulites
17	D2 loc. 1	29000000	–	0.07	15.7	O, Ca, Cl/Q?	White layer
40	D2 loc. 1	14000000	100000	0.07	16.4	O, Ca, D, Cl/Q?	White layer 30 cm from sample 17
41	D2 loc. 1	500000	–	0.03	10.8	Cl, Q, Ca, D?	Brown sediment back side 27 cm from sample 17
112	D2 loc. 2	3000000	200000	0.00	14.3	Q, O, Ca, D, Cl	Brown sediment immediately below white layer
35	D2 loc. 2	11000000	80000	0.07	16.1	O, Cl, Ca	White sediment
36	D2 loc. 2	20000000	40000	0.05	13.2	O	White sediment
69	D2 loc. 2	14000000	400000	1.7	19.2	O, Ca, D, Q?	Gray-loose sediment
43	D2 loc. 2	4000000	400000	0.03	11	Q, Ca, Cl	Brown sediment above white layer
5181	D2 loc. 3	1000000	–	0.03	6.4	Cl, O, Ca	Brown sediment immediately below white sediment
5110	D2 loc. 3	17000000	17000	0.00	16.6	O, Q, Cl, Ca	White sediment
5121	D2 loc. 3	17000000	26000	0.00	13.8	O, Cl, Q, Ca	White sediment
5171	D2 loc. 3	23000000	400000	2	11.6	O, Q, Cl, Ca, D	Gray sediment
5172	D2 loc. 3	6000000	300000	4	12.5	Cl, Q, O, Ca, D	Gray sediment
5035	D2 loc. 3	1000000	100000	0.11	16.3	Cl, O, Ca, D?	Brown sediment immediately above white sediment
39	D1 “control”	30000	–			Cl, Q	Mudbrick
135	D2 “control”	18000	–			Cl, Q	Mudbrick

Ar, aragonite; Ca, calcite; Cl, clay; D, dahllite (phosphate mineral); O, opal; Q, quartz. A refractive index ratio above 1 indicates burned phytoliths and below 1 indicates un-burned phytoliths.

following Elbaum et al. (2003). Slides were prepared using a refractive index medium of 1.440 which is the value that distinguishes burnt from unburnt phytoliths. The ratio between the number of phytoliths with  $RI > 1.440$  and the number with  $RI < 1.440$  was determined.

A small reference collection of seven modern grass species (divided into their different parts, when possible) were collected in the summer of 2005 from the area of Tel Dor for comparative purposes (Table 4). The methods used to prepare this collection follow Albert and Weiner (2001).

### 2.3. Micromorphological analysis

Micromorphology was used to better understand the depositional context of each of the layers, and possible post-depositional changes. Undisturbed, oriented sediment blocks were taken from the six localities listed in Table 2. Each of these blocks included the phytolith layer under study and the sediments immediately below and above it. The blocks were

carved out of standing sediment profiles (baulks), coated with Plaster of Paris in order to keep them intact, and embedded in polyester resin in the laboratory. The embedded blocks were sawed into  $5 \times 7.5$  cm sub-blocks from which  $30 \mu\text{m}$  thin sections were prepared. The thin sections were viewed using a polarizing light microscope (Nikon, Labophot2-pol) and described following Bullock (1985) and Courty et al. (1989).

### 2.4. Analysis of dung spherulites

The number of calcitic spherulites present in each sample was quantified (Table 2). The spherulite quantities in the archaeological sediments were compared to four modern dung samples: two from cattle and sheep in northern Israel and two from goats from southern Israel. The dung was ashed in an oven at  $550^\circ\text{C}$  for 4 h. An accurately weighed aliquot of ca. 1 mg was put on a microscope slide and counted under the microscope as described above for phytoliths. The results show that the spherulite concentrations in modern livestock

Table 3  
 Morphometric parameters used to characterize dendritic epidermal long cell phytoliths from modern *Triticum* and *Hordeum* species and from archaeological samples

Morphometric parameters	<i>T. dicoccum</i>		<i>T. aestivum</i>		<i>H. marinum</i>		<i>H. vulgare</i>		G loc. 2.77		D2 loc. 2.35		D2 loc. 3.5171		D2 loc. 2.112	
	Mean	STD	Mean	STD	Mean	STD	Mean	STD	Mean	STD	Mean	STD	Mean	STD	Mean	STD
Area	455.1	244.5	258.1	122.5	194.9	75.1	112.6	42.2	332.9	197.9	173.8	74.0	264.1	168.1	287.9	106.5
Convex area	715.3	296.5	451.7	196.9	389.9	168.0	229.2	85.0	581.9	315.0	276.5	111.1	431.1	245.5	490.1	192.6
Perimeter	272.7	66.5	190.4	64.1	196.8	69.7	139.4	40.4	205.1	72.8	138.6	38.7	192.1	86.0	196.5	67.4
Convex perimeter	141.0	29.3	107.2	28.1	97.4	32.2	78.4	24.1	119.5	40.0	74.7	19.8	99.3	38.5	114.1	33.4
Length	57.9	12.9	42.1	13.0	38.1	14.8	31.3	10.9	46.9	19.4	28.2	8.7	38.5	17.6	46.1	16.3
Breadth	15.2	4.0	13.2	3.9	12.3	3.0	9.4	1.8	16.8	5.5	12.0	3.3	13.9	3.5	13.5	3.6
Fiber length	52.8	12.6	37.5	12.7	33.5	15.6	27.7	11.0	41.7	20.2	24.1	8.5	34.4	17.1	41.1	15.2
Width	4.0	2.6	2.6	1.2	2.1	0.7	1.4	0.5	3.2	1.4	3.2	1.4	3.1	1.7	2.9	1.4
Equivalent diameter	58.8	12.8	43.1	12.9	37.7	15.9	32.3	11.0	48.3	19.5	29.1	8.4	39.2	17.3	46.9	16.2
Inscribed radius	29.4	6.4	21.6	6.5	18.9	7.9	16.2	5.5	24.2	9.7	14.6	4.2	19.6	8.7	23.4	8.1

Measurements in  $\mu\text{m}$  or  $\mu\text{m}^2$ . The morphometric parameters measured are as follows: area (simple area of the feature); convex area (area within a taut-string around the feature); perimeter (length of the feature boundary); convex perimeter (length of a taut-string around the feature); length (longest cord within the feature); breadth (minimum caliper diameter of the feature); fiber length (length of the feature along its medial axis); width (minor dimension of the feature); equivalent diameter (diameter of a circle with the same area as the feature) and inscribed radius (radius of largest circle that can be drawn in the feature).

dung range between 50 and 350 million spherulites in 1 g of ashed dung.

### 3. Results

Table 2 lists the samples analyzed, their phytolith and spherulite concentrations and major mineral components. The refractive index (RI) ratio shows whether the phytoliths are burnt or not.

#### 3.1. Structure of the phytolith layers

Micromorphological observations show that phytolith-rich layers may have two different microstructures; a microlaminated structure and an un-oriented, massive, structure (Fig. 2a and b). The former often contains articulated phytoliths, mostly comprising long cells that form clearly defined laminae. All layers include quartz silt and sand grains, clay and calcite to varying extents. Some layers may be centimeters thick (Fig. 2c), others as thin as 1 mm, and in some cases only between 20 and 50  $\mu\text{m}$  (Fig. 2d). Gray layers that are rich in phytoliths are mostly massive with microlaminated domains. They contain large amounts of microscopic charcoal. The gray color is derived from the charcoal. They are thus a product of burned vegetal matter (Fig. 2e).

#### 3.2. Amounts and types of phytoliths

The sediments analyzed have phytolith concentrations ranging from 100,000 to 46 million phytoliths per gram. This can be compared with the 18,000 and 30,000 phytoliths per gram in two mud brick samples (Table 2). An analysis of the phytolith morphotypes shows that in general between 40% and almost 70% of all the phytoliths in these samples are derived from grasses (Piperno, 2006; Rosen, 1992, 1993; Rosen and Weiner, 1994; Twiss et al., 1969). The remaining predominant morphotypes include cylindroids and parallelepiped elongates with smooth or rugose margins. These are characteristic of monocotyledonous plants in general, including sedges, palms, grasses etc. (Albert, 2000; Bamford et al., 2006; Rosen, 1992; Twiss et al., 1969). They are also produced in great numbers in the leaves and stems of grasses (Bamford et al., 2006; Rosen, 1992; Twiss et al., 1969). As no phytoliths indicative of other monocotyledonous families were observed in the samples, and as some of the multicellular structures with smooth margins had short cells from grasses attached, we assume that all the phytoliths with these morphologies were also derived from the leaves and stems of grasses. This implies that the proportion of grasses in the samples analyzed is around 85% or more of all the phytoliths. Phytoliths from the inflorescence of grasses constitute between 40 and 52% of all the phytoliths. This is a relatively large proportion and indicates that, at least in the contexts investigated, whole plants (presumably without roots) were brought to the site (or consumed offsite and deposited onsite as dung or dung-products). A key question for understanding the formation of these layers is whether or not the grasses were derived from wild or domesticated plants.

Table 4  
 Modern plants analyzed according to their plant parts, and the number of phytoliths per gram of dried organic material

Species	Part of the plant	Number phytoliths per 1 g dried material	Ratio individual/multicellular structures
<i>Avena sterilis</i>	Leaves	7000000	2.3
	Stem	1000000	0.8
	Inflorescences	2000000	1.7
<i>Hordeum bulbosum</i>	Leaves	2000000	3.6
	Stem	40000	0.3
	Inflorescences	2000000	1.4
<i>Hordeum marinum</i>	Leaves	2000000	17.1
	Stem	10000	4.2
	Inflorescences	1000000	2.1
<i>Lagurus ovatus</i>	Leaves	1000000	9.3
	Stem	40000	4
	Inflorescences	400000	1.2
<i>Hordeum vulgare</i>	Inflorescences	400000	2.5
<i>Triticum dicoccum</i>	Inflorescences	752000	1.4
<i>Triticum aestivum</i>	Inflorescences	400000	1.4

The ratios of single-celled (individual) phytoliths to multi-celled phytoliths are also shown.

### 3.3. Differentiating between domesticated (cereals) and wild grasses based on phytolith morphologies

This is particularly challenging as short cell phytoliths are abundant in all the samples and they are all derived from the Festucoid sub-family, which includes cereals such as barley (*Hordeum*), wheat (*Triticum*) and oats (*Avena*). Most grass phytolith studies to date focus on phytoliths from the inflorescence to identify the genus, and in some cases even the species. Rosen (1993) and Rosen and Weiner (1994) highlight the importance of a detailed morphological study of papillae cells in conjunction with the type of decoration from the long cells to differentiate between *Hordeum* and *Triticum* in the Near East. Piperno and Pearsall (1993) focus on the short cells of maize in the tropical forests. Berlin et al. (2003) and Ball et al. (1999) performed detailed morphometric studies of long cells with echinate or wavy margins to identify different grass species.

Table 4 lists the reference grass species analyzed, the number of phytoliths per gram of dry organic material and the ratio between individual (i.e., single-celled phytoliths) and multicellular (i.e., multiple-celled or interconnected phytoliths) structures. The latter provides some information on the extent of silicification of the different plants. A correspondence analysis of the different phytolith morphological types among the modern species analyzed, shows that phytoliths vary morphologically depending on the plant part: stems, leaves and inflorescences (Fig. 3). Furthermore, the inflorescences of the domesticated species are differentiated to some extent from the wild species. This implies that there are morphological differences that can differentiate between wild and domesticated grass plants. In general, inflorescences of grasses are represented by more than 40% long cells. In some cases such as *Triticum aestivum* this percentage increases to 72%, and in the wild grass *Lagurus ovatus* it is 11%. More than 67% of the total long cells identified in the inflorescences have decorated margins (dendritic, echinate, wavy, verrucate, etc) (Fig. 4a and b). The exception is *Lagurus ovatus*, where

most of the long cells identified have a smooth or rugose margin. The remaining phytolith morphologies were prickles, papillae and short cells (Fig. 4c and d).

In our limited reference collection, only long cells with dendritic margins are characteristic of domesticated grasses, with one exception (*Hordeum marinum* which is a wild grass). Moreover, only *Triticum dicoccum* has interconnected cells or multicellular structures with dendritic morphologies (Fig. 4e and f). All the other phytolith long cell morphologies are present both in wild and domesticated grasses in different proportions. In our reference collection the proportion of long cells with dendritic margins in domesticated cereals is 7–8% of all the morphotypes present. Thus as a first approximation of the proportions of domesticated and wild grasses present in a given phytolith assemblage, we assume that 7–8% long cells with dendritic margins implies that the grasses were derived entirely from domesticated species, and lesser amounts imply a mix of domesticated and wild species. We note that none of our sediment samples contained more than 7–8% long cell dendritic phytoliths.

In order to obtain a more precise identification of the origin of the dendritic morphology of phytoliths present in the archaeological samples, we performed a morphometric test on several archaeological samples following the method of Ball et al. (1999). The results were compared to those obtained from the modern plant reference collection. Fig. 5 shows that brown sample 112 has dendritic morphologies similar to those in *Triticum aestivum*. White sample 77 and gray sample 5171 also bear a strong resemblance to *Triticum aestivum*. White sample 35 is similar to both *Triticum aestivum* and *Triticum dicoccum*. None of the samples analyzed show similarities to *Hordeum*. The presence of *Triticum aestivum* is consistent with identification of macrobotanical remains recovered from various sites in the region that span the Bronze and Iron ages (Berlin et al., 2003; Borowski, 1987).

Another approach used to identify the type of grass present in the samples and to determine if domesticated or wild grasses are present, is the study of silicified multicellular

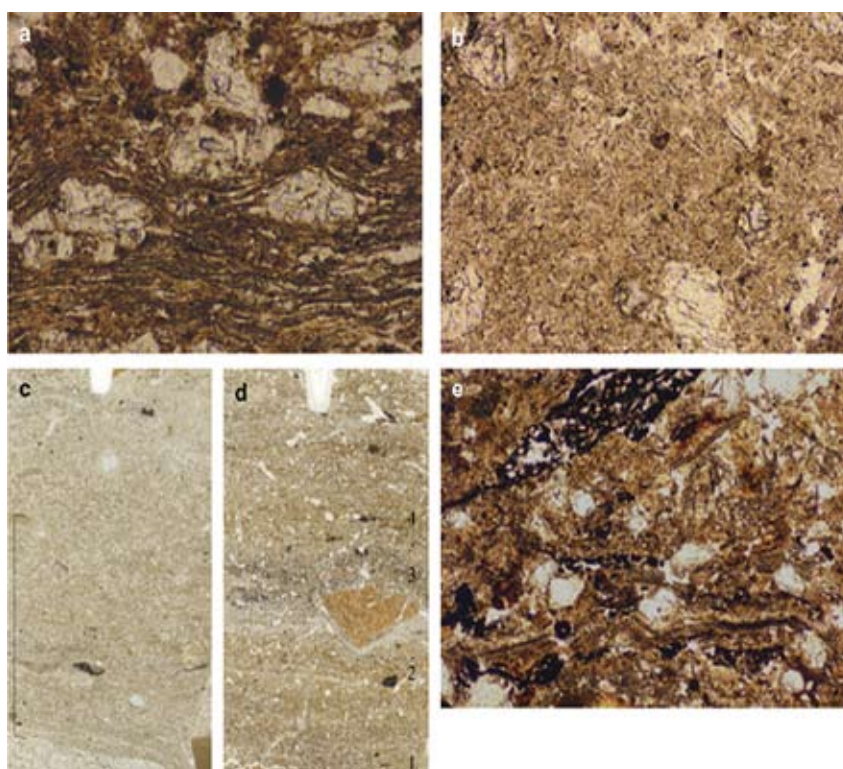


Fig. 2. Mesoscopic and microscopic characteristics of phytolith-rich layers in Tel Dor. (a) Photograph showing microlaminated microstructure from locality D5, plane polarized light (ppl). The large transparent to purplish grains are quartz sand grains. Note that the microlaminae on-lap onto the quartz grains resulting in undulations of the microlaminae. Width of frame is 1.07 mm. (b) Photograph showing un-oriented massive microstructure from locality D2-2, ppl. The large transparent to purplish grains are quartz sand grains. Width of frame is 1.07 mm. (c) Scanned micromorphological thin section from locality G-1 showing a thick accumulation composed almost purely of phytoliths. This uninterrupted accumulation is 3–4 cm thick (marked on the scan). Width of scan is 3.7 cm. (d) Scanned micromorphological thin section from locality D5 showing four thin layers of phytoliths (numbered 1–4) alternating with brown sediment. The layers are between 1 mm thick and up to ca. 5 mm thick. Note that the gray colored layer numbered 3 is burned. Width of scan is 3.5 cm. (e) Microphotograph showing a phytolith-rich gray-colored burned sediment that was identified directly on the white phytolith-rich layer in locality D2-3, ppl. The large transparent to purplish grains are quartz sand grains and the black structures are charred plant remains. The overall microstructure is un-oriented but includes domains of microlaminated phytolith arrays (bottom part of the photograph). Width of frame is 2.14 mm.

140

structures cells (Rosen, 1992). Our study shows differences in maximum width and shape of waves between *Hordeum* and *Triticum* (Fig. 6a and b). The morphometric analysis shows that most of the long cells that form the multicellular structures in the archaeological samples resemble in maximum width and shape of wave, phytoliths from *Triticum aestivum* (Fig. 6c).

In conclusion, a good approximation of the proportion of domesticated cereals can be obtained from the amounts of long cell dendritic phytoliths, with 7–8% implying that all the phytoliths were derived from cereals. Furthermore, most of the phytoliths from cereals originate from *Triticum*.

#### 3.4. Detailed analyses of the six phytolith-rich layers and associated sediments

Fig. 7 shows the percentages of the most abundant phytolith morphotypes present in each of the samples analysed from the six locations. Note that duplicate or triplicate samples from the phytolith-rich layers were analyzed and the standard deviations are shown. We assume that similar error bars would be obtained

from the other samples. The following are detailed descriptions of the six localities (see Fig. 1 for localities on the tell).

##### 3.4.1. Area G locality 1

3.4.1.1. *Archaeological context.* This is the thickest phytolith-rich accumulation observed to date at Tel Dor (in places 30 cm or more). It was produced at the beginning of phase G/11 (square AJ32N, locus 18497). The underlying phase, local phase G/12, is the earliest exposed in area G, reached only in two limited probes. It consists of a thick fill with no discernable surfaces and is not associated with any known architecture. The sherds in this fill date it to the Late Bronze Age II (the 14th to 13th century BCE). Phase G/11 also has no architecture in the excavated area, save for one installation—three low stone walls (W18463, W18471, and W18528) framing an area filled with bivalve shells of the genus *Glycymeris*. Other than that, phase G/11 is evident only in a series of superimposed phytolith-rich gray and white layers, generally sloping from northeast to southwest. These were found below the shell-floor installation. Some of the sediments in this phase

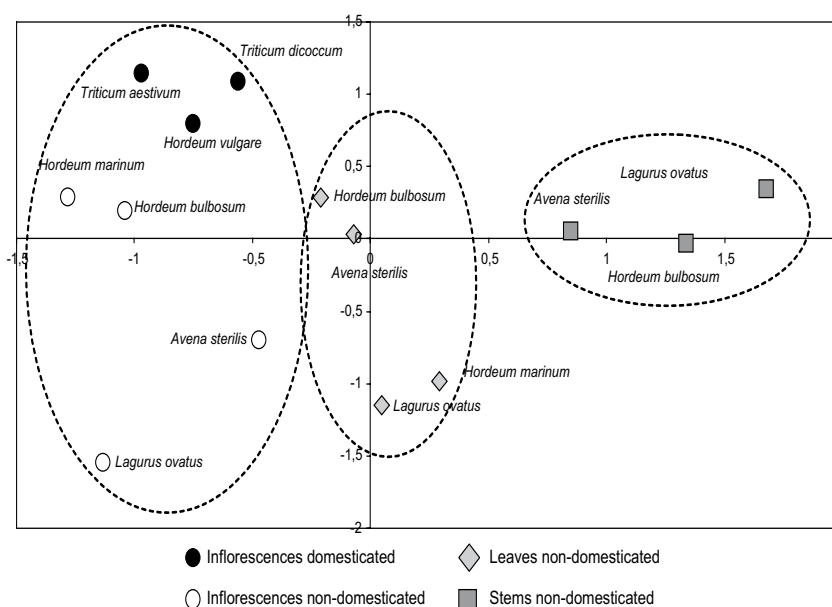


Fig. 3. Correspondence analysis of phytolith morphologies from the modern plant reference collection according to their different parts. Note that the various plant parts tend to cluster and that the inflorescence phytoliths of domestic species can be distinguished from the inflorescence phytoliths of wild species.

are heated sediments in secondary deposition (Berna et al., 2007). The pottery assemblage from phase G/11 mostly dates to a late phase in the Late Bronze Age II (mid-late 13th century BCE). As no real architecture was found in phase 11, we deduce that this was an open space.

**3.4.1.2. Micromorphology.** A 20 cm long block was extracted at a location where the layer is ca. 12 cm thick. The brown sediment below this layer is composed of quartz sand grains, calcite, clay and artifacts (e.g., ceramics, bones). Its uppermost part contains authigenic phosphate nodules. A densely laminated phytolith-rich layer lies just above the brown layer (Fig. 2c). This layer includes quartz sand grains, calcite, clay, charcoal, wood ash and bones, in addition to many phytoliths. In its lower part calcite seems to have dissolved and in certain places calcitic components such as rock fragments have phosphatic reaction rims. Dung spherulites are not abundant in the section. Certain spherical features ca. 20–50  $\mu\text{m}$  in diameter, are composed of phosphate, which may represent phosphatized dung spherulites. The presence of dissolved calcite and phosphate nodules even below the phytolith-rich layer indicates that degrading organic matter released phosphate and acids that percolated into the sediments below.

**3.4.1.3. Phytolith assemblages.** The layer was divided into three sub-layers differentiated mainly by color; sample 32 was grayer than the samples immediately above and below (samples 31 and 3). The white-gray sample 32 has less phytoliths and less dung spherulites. Note the abundance of dung spherulites in samples 31 and 3 (Table 2). Morphologically, the three phytolith-rich layers are dominated by grass phytoliths with a high proportion of inflorescence derived phytoliths (Fig. 7). The proportion of dendritic epidermal long cell phytoliths is around 2–4%, implying that less than half the phytoliths were derived

from domesticated cereals. None of these sub-layers contain burned phytoliths. We also noted that the lowest layer (3) contains many weathered phytoliths (Table 2).

#### 3.4.2. Area G locality 2

**3.4.2.1. Archaeological context.** This phytolith-rich layer (locus F04G-004; Fig. 8a) is located inside a built-up space (room or inner courtyard) that is part of a much larger building complex—a courtyard building of the early Iron Age (Fig. 8b). This structure was first built in local phase G/10 (Irlac. early to mid 11th century BCE; for a discussion of the Early Iron Age sequence at Dor and its radiocarbon dating see Gilboa and Sharon (2003), Sharon et al. (2005) and Sharon and Gilboa (in press). It remained in use for a long time and was structurally modified several times (local phases G/9, 8, 7, 6 span the Iron Age I and extend into Iron Age IIA (local terminology: Ir1a to Ir2a), until the 9th century BCE according to the Dor radiocarbon chronology). At the end of phase G/9 the building suffered a major destruction (c. 1000 BCE; e.g., Sharon and Gilboa, in press; Berna et al., 2007) but was quickly rebuilt along the same lines as before.

When sampled, F04G-004 was confined on two sides by walls (W9211 to the north and W9140 to the east). Wall W9140, built of boulders (Fig. 8a in background) overlies another wall built of smaller stones (W9915, barely visible in Fig. 8a). There is also a small but distinct offset between them. These two construction phases were attributed to phases G/9 and G/10 respectively.

The distinct burnt layer of the G/9 destruction (Berna et al., 2007; Sharon and Gilboa, in press) was concentrated in the SE part of the building and gradually decreased towards the north and west. In the sampled room, there was no evidence of fire, but mud-brick collapse of the superstructure was found against

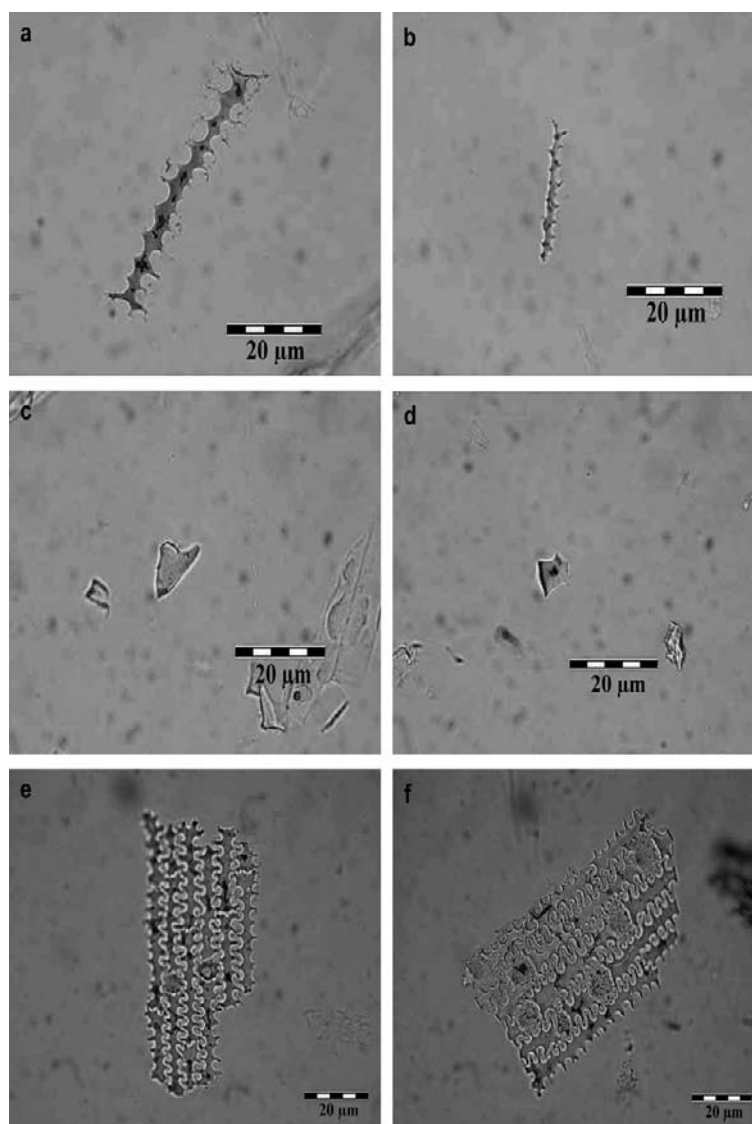


Fig. 4. Photomicrographs of phytoliths from the modern plant reference collection. Pictures taken at 400 $\times$ . (a) Long cell with dendritic margin identified in the inflorescence of *Triticum aestivum*, (b) long cell with echinate margin from the inflorescence of *Triticum dicoccum*, (c) prickle from the leaves of *Avena sterilis*, (d) short cell rondel from the inflorescence of *Hordeum bulbosum*, (e) and (f) multicellular structures with dendritic morphologies from the inflorescence of *Triticum dicoccum*.

the phase G/9 walls. It sealed the phytolith-rich layer and ceramic vessels in primary deposition, though not quite in articulation, in and above the phytoliths. Thus F04G-004 should represent the floor level at the time of the phase 9 destruction. Interestingly, however, the phytolith-rich layer does not abut the bottom of the phase 9 wall, but abuts the underlying wall from phase 10, a few centimeters below its top (Fig. 8a). Thus technically it should be related to phase 10. This in turn implies that an undisturbed phase 9 collapse has no phase 9 living-surface below it. A possible solution to this stratigraphic conundrum may be related to the taphonomy of phytolith-rich layers (see below).

Sifting of the phytolith-rich layer sediment produced dozens of tiny beads—c. 1 mm thick or less—made of gold, copper glass and frit. Below the phytolith-rich layer was a rough flagstone pavement, whose relation to the walls could not be established and below that were more phytolith-

rich layers. The fact that this space was stone-paved is unusual. Elsewhere in Iron Age buildings at Dor, including in monumental constructions, floors were earthen. In the area G building in question, the only other space that was continuously (partially) stone-paved is its central courtyard, which throughout its existence served various industrial activities.

**3.4.2.2. Micromorphology.** A series of thin (millimeters to centimeters in thickness) white phytolith-rich layers are present, separated by layers of brown clay-rich sediment. The micromorphological section shows two layers both possessing a microlaminated structure. The laminae are dense (ca. 10% voids by area). The two layers contain only small amounts of quartz sand grains (ca. 10% by area), clay and calcite, in addition to the opaline phytoliths. Dung spherulites are notably absent in the section (see also Table 2). Authigenic



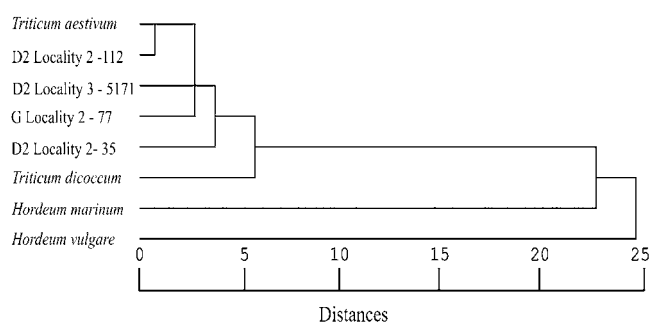


Fig. 5. Comparison of phytolith morphometries between archaeological and modern plant reference collection samples showing nearest neighbor analysis using Pearson's correlation index. The archaeological samples are close to *Triticum aestivum*, with the exception of sample D2 locality 2 35 which is equidistant from both *Triticum aestivum* and *Triticum dicoccum*.

phosphate nodules (composed of dahllite) are present, indicating that organic matter degraded at this location.

**3.4.2.3. Phytolith assemblages.** The white colored layers contain mainly grass phytoliths with a high proportion of inflorescence derived phytoliths. The phytolith morphotype analyses of the thicker white layers all show that the dendritic epidermal long cell phytoliths constitute between 7 and 8% of all the phytoliths. This is the same proportion present in modern domesticated cereals. Furthermore morphometric analysis shows that these phytoliths are similar to the modern wheat species, *Triticum aestivum*. We therefore conclude that most of these phytoliths were derived from domesticated cereals. Spherulites and other microremains such as starch grains were not identified in any of these samples (Table 2). Most

of the phytoliths have a refractive index lower than 1.440, indicating that these plants were not burnt (Elbaum et al., 2003) (Table 2).

### 3.4.3. Area D5

**3.4.3.1. Archaeological context.** This excavated area (phase D5/10) is a large (at least  $5 \times 10$  m) apparently open space in squares AV/8–10 (Fig. 9). At present it is unclear whether it relates to any architecture. (In the immediate preceding and subsequent phases in this area (respectively D5/11 and D5/9), this space is bounded by walls. The three rubble walls in Fig. 9 belong to phase D5/9 and cut the sediments analyzed here). Phase D5/10 dates to the Iron Age I/II transitional phase (Ir|2 in Dor terminology, c. 900/880 BCE, by the Dor

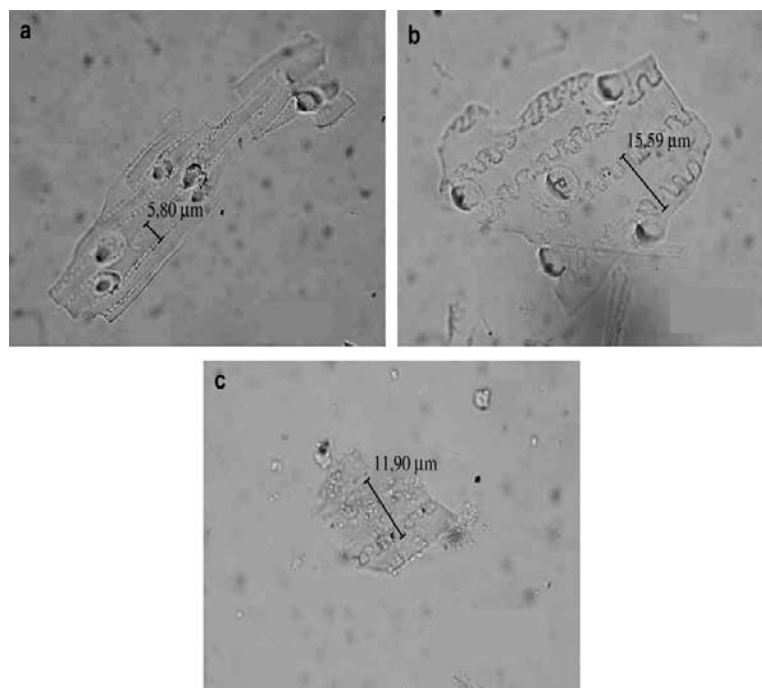


Fig. 6. Photomicrographs of silicified multicellular structures showing the differences in maximum width and shape of waves between *Hordeum* and *Triticum*. (a) Multicellular structures of long cells with wavy margin from the inflorescence of *Hordeum vulgare*. (b) Multicellular structures of long cells with wavy margin from the inflorescence of *Triticum aestivum*. (c) Multicellular structures of long cells with wavy margin from archaeological sample 5171.

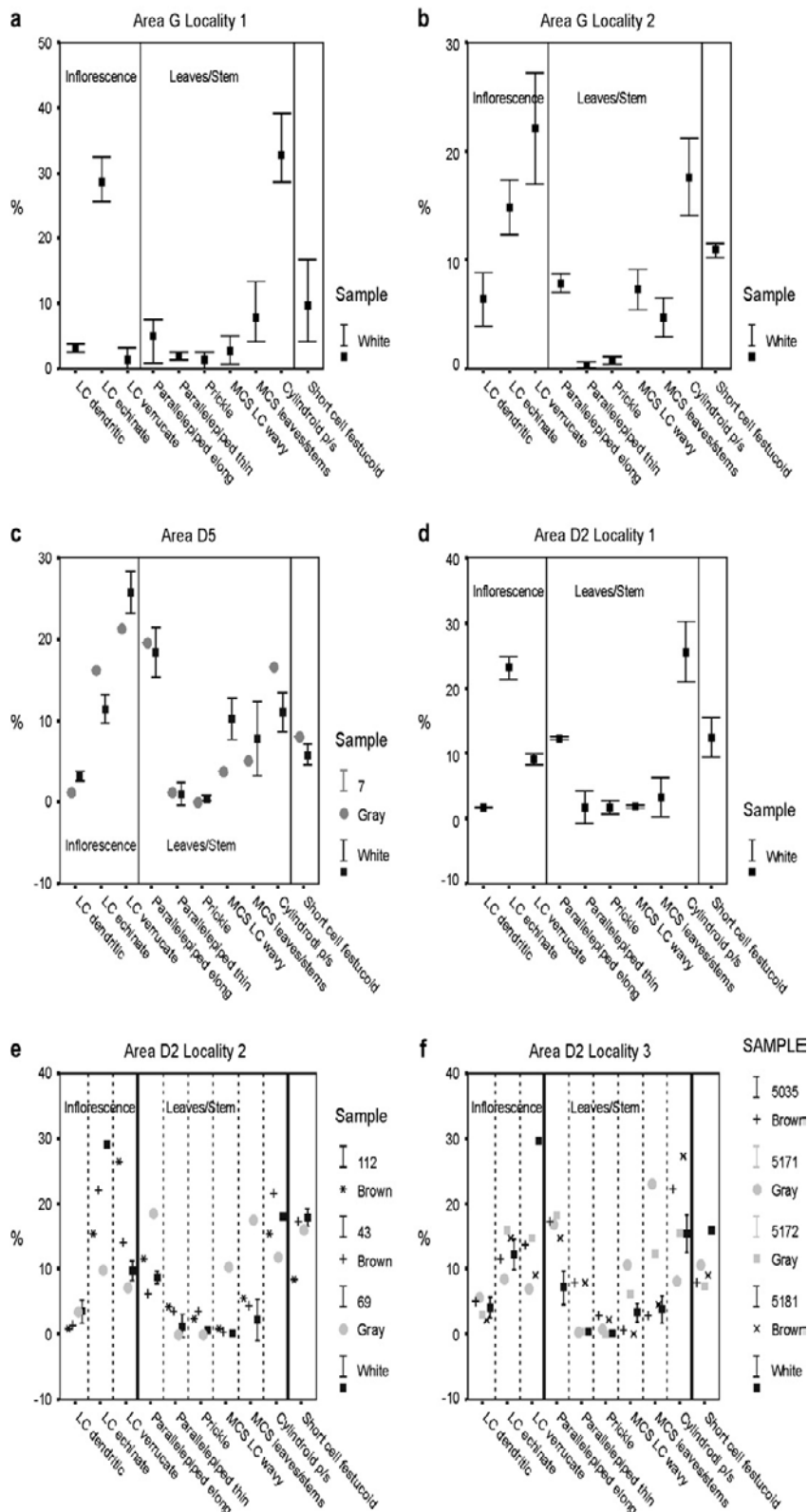


Fig. 7. Plots showing the percentage of the phytolith morphologies identified in the six localities analyzed. This percentage includes only those morphologies that exceed 2% of the total phytolith record. White sediments from a same locality are plotted together showing the average with the standard deviation bar (see Table 2 for description of samples). Each plot is separated according to the provenance of the different phytoliths morphological types in the plant (inflorescence, leaves/stems and non-specific plant part). LC, long cells; MCS, multicellular structures; p/s, psilate/scabrate margin.



Fig. 8. Area G locality 2. (a) The phytolith-rich layer exposed in area G locality 2; (b) section through the phytolith layer showing how it on-laps onto the adjacent wall (arrow).

radiocarbon sequence). The whole area consists of a series of thick and thin phytolith-rich layers. At the macroscopic level, the white phytolith layers are interspersed with dark brown mud-brick material. The layers are extremely uneven. The entire series is as thick as 1 m in places. It generally slopes from north to south in a series of distinct 'steps' as well as sloping from west to east in a less dramatic fashion. Moreover, the center of the area forms a trough-like depression, as wide as 1 m and 50 cm deep. One part slopes from north to south and another to the east, to form a sunken "Γ" shaped feature (Fig. 9). Abundant ceramics in all these layers comprised small potsherds only, and bones, obviously in secondary deposition. Immediately below the series of phytolith-rich layers is a heavily burnt destruction layer (phase D5/11) containing many *in situ* pots dating to the Iron Age I.

**3.4.3.2. Micromorphology.** A 25 cm long block was extracted that included alternating white-brown sediments and uniformly brown sediment above. Thirteen distinct phytolith-rich layers over a total thickness of 20 cm were identified. Their thicknesses vary between 1 and 10 mm. One of these layers appears to be burnt based on the abundance of charcoal and calcitic ash. The thickness of the brown sediment between these layers varies between 5 and 15 mm. All layers are microlaminated, but with different phytolith densities, i.e., some

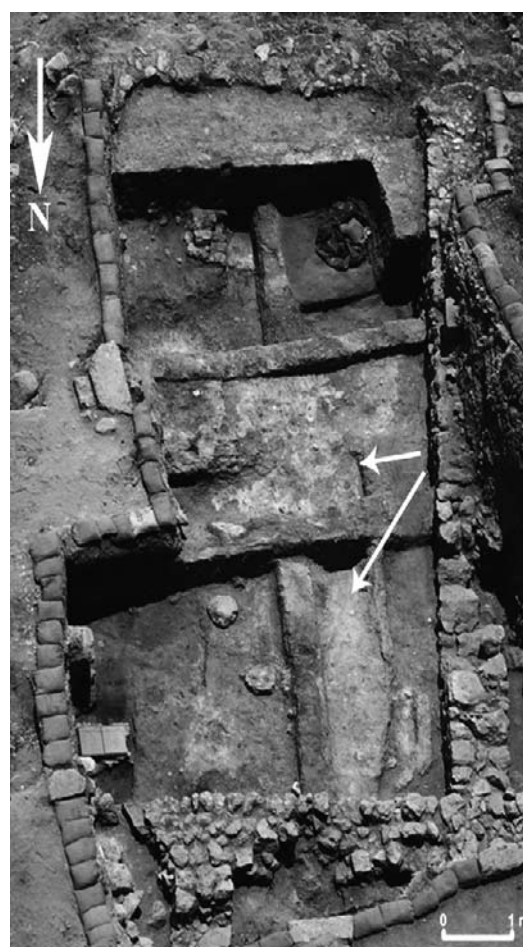


Fig. 9. Aerial photograph of the area D5 phase D5/9 showing the two orthogonal trough-like structures (arrows) with phytolith-rich layers exposed.

show compacted phytoliths stacked one on top of the other, and others show an accumulation of white fiber-like micro-layers alternating with brown material. The overall porosity of these layers varies between 10 and 30% of void areas. Usually a 10% void area corresponds to high phytolith densities. Other materials identified in some of the phytolith layers, include dung spherulites, microscopic bones, burnt clay, charcoal and ash, in addition to the usual quartz sand grains, clay and calcite (Table 2, Fig. 2d).

**3.4.3.3. Phytolith assemblages.** Phytoliths were well preserved and more abundant in the white and gray samples as compared to the brown samples. The refractive index ratio is always below 0.1 indicating that the phytoliths were not burnt. The exception is the gray colored lens (sample 7), where the phytoliths have a refractive index ratio of 5 (Table 2) and are therefore burnt. Grasses represent more than 91% of the total phytolith count, and the proportions of phytoliths from the inflorescence parts are relatively high. The exception is sample 17, which has an inflorescence content of 26%. The proportion of dendritic epidermal long cell phytoliths is between 1 and 4%, implying that, at most, about half the phytoliths were derived from domesticated cereals. We also noted

the presence of a few short cells of bilobates, either from C4 grasses or in sample 17. The grasses are derived from both wild and domesticated plants. Dung spherulites are present in the white and gray powdery samples, but are more abundant in brown sample 17.

#### 3.4.4. Area D2

We analyzed three phytolith-rich layers from this area (Fig. 10, localities 1, 2 and 3). All are ascribed to phase D2/6. Phase D2/6 is composed of a series of occupation surfaces, pits and depressions which cut the massive ashlar architecture and crushed *kurkar* floors of phase 7 (Iron Age IIA, 9th century BCE). The general character of phase D2/6 indicates an open area, dotted by refuse pits. It is quite long-lived, spanning the Iron Age IIB (8th century BCE) and Iron Age IIC (7th century). During this time pits were filled in, often with alternate layers of different materials, and new pits were dug, sometimes cutting earlier ones. The different ages of the sub-phases are sometimes discernable stratigraphically and sometimes by the relative typology of the ceramic assemblages within them.

#### 3.4.5. D2 locality 1

**3.4.5.1. Archaeological context.** This phytolith-rich layer was found over an area of some  $4 \times 4 \text{ m}^2$  (square AO12, locus L04D2-023) (Fig. 10, L 1), and in one place it was draped over a group of fairly large fallen stones. There is no evidence that this layer was part of a pit or dumping area. This phytolith-rich layer forms one of a series of more-or-less horizontal surfaces which underlie phase D2/5 (Persian period) walls in AO12 and seal the crushed *kurkar* surfaces that reach the ashlar walls of phase D2/7. Thus, by default, the phytolith-rich layer should be considered a phase 6 feature, though there is no stratigraphic link between it and the phase 6 pits in AM14–AO14 (discussed below). The ceramic horizon indicated by their contents is unclear: somewhere in the 9th to 8th century BCE range. No architecture is associated with

phase D2/6 in this unit. The best assessment is that this was an open area, littered with stones and other debris from the collapse of previous structures.

**3.4.5.2. Micromorphology.** A 15 cm long block was examined that includes brown sediment below the white layer. The latter is overlain by gray sediment. The white phytolith-rich layer, ca. 10 cm thick, has a massive and compact microstructure (Fig. 2b). It has vertical voids (channels) through which water drained downwards. Calcite hypocoatings are present around the voids, and movement of quartz grains along the vertical drainage channels is also evident. The drainage channels caused fragmentation of the phytolith-rich layer. Intact domains of the phytolith-rich layer found between the drainage channels have ca. 5% voids by area and ca. 10% quartz grains by area. The layer also contains calcite and clay, small amounts of charcoal and fragments of bones, shells, burned *kurkar* and pottery. There are several small domains that possess a microlaminated structure. Dung spherulites, as well as phosphatized spherulites and phosphate nodules are present in the section. These data indicate that the layer is derived from dung and it resembles the layer described below for D2 locality 2, square AO14.

**3.4.5.3. Phytolith assemblages.** The phytolith assemblages of the two white samples are very similar, but the brown sample from associated sediment is significantly different both in number (Table 2) and morphology (Fig. 7). Only one of the white samples however contained spherulites. The refractive index ratio is below 0.1 in all three samples indicating that the phytoliths were not burnt. The assemblage of phytoliths is similar to that found in locality 2, square AO14 (see below) although with a lesser proportion of dendritic long cell phytoliths, which is around 2%, implying that most of the phytoliths were derived from wild grasses.

#### 3.4.6. D2 locality 2

**3.4.6.1. Archaeological context.** This phytolith-rich layer covers a relatively large area (square AO14, locus F04D2-063) (Fig. 10, L 2), and follows the underlying surface topography. The latter was formed by two large pits dug prior to the deposition of the phytolith-rich layer. Pit L05D2-544 is the earlier of the two. After it was filled in, another pit (L05D2-517) was dug, partly cutting into L05D2-544. Both pits cut the large ashlar wall W04D2-065 of phase D2/7 and its associated crushed-*kurkar* floors. The phytolith-rich layer studied in detail covered pit L05D2-544 more-or-less horizontally, but then sloped sharply (at one spot almost vertically) into pit L05D2-517 where it continued at a lower elevation. There is no direct stratigraphic link between the pit-complex in AN-AO14 and that of AM14, but the pottery horizon of the entire AO14 complex (including the potsherds found in the phytolith layer itself), is definitely early in phase D2/6 (Iron Age IIB (8th century BCE) rather than Iron Age IIC (7th century). The nature of the fill-layers is also different. The AO14 pits contain far less pottery than the AM14 7th century pit (below). It represents a 'mundane' household

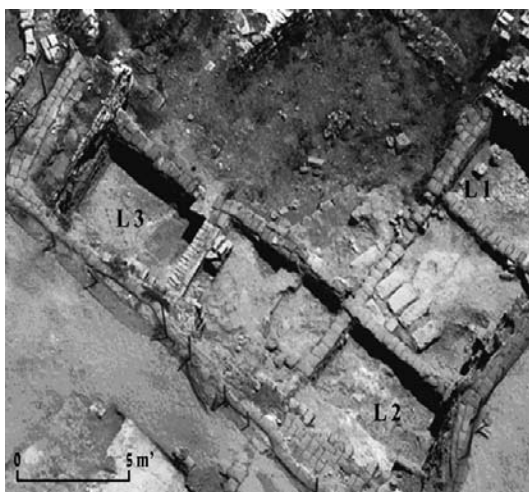


Fig. 10. Aerial photograph of area D2 showing the locations of the three phytolith-rich layers studied. (a) Locality 1, square AO12; (b) locality 2, square AO14; (c) locality 3, square AM14. The excavation squares are  $5 \times 5 \text{ m}$ .

assemblage, mostly not in primary deposition, and little or no metallurgical wastes.

**3.4.6.2. Micromorphology.** Two blocks were collected. One includes the white phytolith-rich layer and the associated brown sediments, and the other a phytolith-rich powdery gray sediment. This block overlies the white phytolith-rich layer in certain places. The white layer possesses a massive, un-oriented, microstructure. It is very compact (5% voids by area) and includes quartz sand grains (10% by area), small amounts of clay, calcite, microscopic bones (some are burnt), and probable burnt mud-brick fragments. It also includes authigenic phosphate nodules that extend to the brown layer below. The gray powdery layer was sampled in the deepest part of the feature. The gray layer possesses a microlaminated structure that is usually not continuous over many centimeters, probably because this layer is very porous (30% voids by area) possibly promoting the collapse of the original microstructure. The gray layer is composed almost entirely of phytoliths. It also includes quartz sand grains (5% by area), clay, calcite, and many charred vegetal remains. Certain rounded silicate grains are amorphous and have a bubbly appearance, and one quartz grain was identified as having an amorphous rim. These properties indicate that the organic matter burnt at a rather high temperature. Other burnt materials found in this layer are calcite nodules, mud-brick and/or ceramic fragments. The layer includes authigenic phosphate nodules.

**3.4.6.3. Phytolith assemblages.** Two samples from the white phytolith-rich layer were analyzed. The gray sample was located on top of the white layer. One brown sediment sample was analyzed from immediately above the same white layer (Table 2). Grasses dominate the phytolith assemblage in all the samples. The proportion of dendritic epidermal long cell phytoliths in both the white and the gray samples is between 3 and 4%, implying that about half the phytoliths were derived from domesticated cereals (Fig. 7). The refractive index ratio of the phytoliths is below 0.1 in all the white and brown sediments and above 1.7 in the gray samples. The phytoliths in the latter are therefore burnt. The white layer contains a relatively high proportion of phytoliths from the inflorescence, and a small number of spherulites (Table 2). The phytolith assemblage from the gray sediment differs from that of the white sediment (Fig. 7), aside from being burnt, by having proportionately more leaf phytoliths than the white layer and many spherulites (Table 2). The brown sediment above the white layer contains relatively high concentrations of phytoliths compared to other clay-rich brown layers, and large amounts of spherulites.

### 3.4.7. D2 locality 3

**3.4.7.1. Archaeological context.** This area was part of a very large (about 100 m<sup>2</sup>) pit that was dug into a mud brick layer (square AM14, loci L05D2-808 and L05D2-801) (Fig. 10, L 3). The abundant pottery dates it to the Iron Age IIC; mostly the late 8th/first half of 7th century BCE. This corresponds

to the Assyrian occupation period of the Levant. Indeed, the pottery is the most remarkable macroscopic aspect of this pit. Some of the layers seem to be composed almost exclusively of large potsherds, many of which could be mended to form complete or near complete vessels. Almost all of these are of two specific types; short-necked straight-shouldered transport jars typical of the 7th century BCE. These are abundant in Phoenician entrepôts across the Mediterranean; and small, crudely formed jugs of an uncommon type, both at Dor and elsewhere. The pit also contains abundant debris from metallurgical industries and two distinct phytolith-rich layers. Here we examined the lower phytolith-rich layer (locus L05D2-808) which is overlain, in many places, by a gray powdery phytolith-rich sediment (locus L05D2-801), which is clearly thicker in the depressed areas. The powdery gray layer forms the base of a burnt assemblage of sedimentary minerals that is over 30 cm thick. In addition to the pottery, many bones were closely associated with the phytolith layers.

**3.4.7.2. Micromorphology.** The white phytolith-rich layer has a dense microlaminated structure. The layer is ca. 3 cm thick with about 10% of voids. The layer contains mainly phytoliths, quartz sand grains (ca. 5%), calcite and clay, and in addition, pottery sherds, shell fragments, kurkar fragments, burnt bones, plaster, and a rounded grain of basalt. Small spherical phosphatized features may be phosphatized dung spherulites. Phosphate nodules are present. They are abundant at the upper centimeter of the layer.

The gray layer immediately above the phytolith layer is ca. 8 cm thick and generally has a massive structure except for areas where charred fibers are horizontally oriented (Fig. 2e). It is relatively porous (ca. 20% voids by area). This layer has more calcite than the layer below and also includes clay and quartz sand grains (the latter comprise some 10% by area). Artifacts in this layer are fragments of pottery, burnt bones (some of them calcined), possible glass, charcoal, burned kurkar fragments with unburnt cores, mud brick fragments, plaster fragments, chalk and one rounded clay curl. Towards the top of this layer is a sub-layer ca. 1 cm thick of articulated microlaminated phytoliths derived from burned grass.

**3.4.7.3. Phytolith assemblages.** Two samples from the white phytolith-rich layer were analyzed. The two gray samples were located on top of the white layer and were separated by a few centimeters. One brown sediment sample was analyzed from immediately below the white layer and another from immediately above the same white layer (Table 2). Phytoliths are abundant in the white and gray colored samples. The phytolith assemblages are similar in the two white phytolith-rich samples, but are different in the gray and brown samples. The two gray samples have different assemblages, even though they are separated by only a few centimeters (Fig. 7). The refractive index ratio indicates that phytoliths were not burnt in the white and brown samples but were burnt in the gray samples. Spherulites are present in small amounts in the white phytolith-rich samples, and are abundant in the gray samples. They were also present in the brown samples

(Table 2). Grasses dominate the assemblages (above 89% of the total counting). The proportions of inflorescences is highest in the white samples (54%), slightly lower in the gray samples (38–43%) and lowest in the brown samples (26–34%). The long cells dendritic phytoliths of both the white and gray layers constitute about 3–5% of the total assemblage. The phytoliths in these layers were therefore derived from a mix of both wild and domesticated grasses. The gray samples contain a small but significantly larger amount of leaf phytoliths as compared to the white samples.

#### 4. Discussion

The phytoliths from the phytolith-rich layers are almost all derived from grasses, with a relatively high proportion from the plant inflorescence. The gray layers all contain burnt phytoliths and a higher percentage of phytoliths from grass leaves, whereas the white layers are not burnt and inflorescence phytoliths are, in general, more abundant. At this level the analyses of the 6 phytolith-rich layers present a rather uniform and consistent picture. There are however significant differences. These are summarized in Table 5.

Three out of the six phytolith-rich layers (area G loc. 1, area D5 and area D2 loc. 3) have properties consistent with having originally been formed from dung in animal enclosures. These are a microlaminated structure indicative of trampling by animals (Shahack-Gross et al., in press), phosphate nodules indicative of the breakdown of organic materials, dung spherulites produced in the digestive systems of certain herbivores, especially abundant in area G loc. 1, and phytoliths derived from a mix of both domesticated and wild grasses. We know from ethnography that a mix of wild and domestic grasses is widely used as animal fodder.

The two phytolith-rich layers in area D2 (localities 1 and 2) differ from the others by having a massive rather than a laminated microstructure. Dung spherulites are either absent or present in low numbers, especially when compared to the gray sediments immediately above (area D2 locality 2). The reason for the low number of dung spherulites could be explained by diagenetic processes (see below). The massive structure is more consistent with animal dung having been re-deposited in these locations. It is possible that the massive structure may indicate localities of dung cake preparation or other activities using dung as a construction material as wetting and churning of dung as a first step in molding dung into specific (macro) structures is a process that probably results in random orientations of the plant fibers in the dung.

The phytolith-rich layer from area G locality 2 presents properties that cannot be interpreted unequivocally. The microlaminated structure implies that this layer resulted from trampling. It is within or on the side of a small paved room floor, includes only cereal phytoliths and dung spherulites are absent. Authigenic phosphate nodules are present, indicating that organic matter degraded at this location. If this was a storage area for cultivated crops, then the presence of a microlaminated texture remains unaccounted for. There is no parsimonious explanation for the formation of this layer.

Concentrations of dung spherulites in modern samples are very high (they range between 50 and 300 million per gram of ashed dung) in relation to the concentrations found in the archaeological sediments (Table 2). This may be due to diagenesis. Spherulites are susceptible to dissolution, especially as the pH becomes acidic when large amounts of organic matter degrades (Canti, 1999). This could even differentially affect the spherulites as compared to the calcite which is present in many of these samples, usually in small amounts. This is deduced from Shahack-Gross et al.'s (2003) observation that the spherulites are initially formed from monohydrocalcite and not calcite. The former is much more soluble than calcite. We also noted phosphatic spheres in the range of sizes that is similar to that of dung spherulites, thus indicating that phosphatization of dung spherulites may occur due to diagenesis in an environment rich in phosphate. Dung spherulites are totally absent from the area G locality 2 phytolith-rich sample. Dung spherulites are produced by many animal species (Canti, 1997) but are known to be present in large amounts in ruminants, i.e., cattle, sheep and goats. A zooarchaeological study in Tel Dor showed that the majority of faunal remains were from sheep and/or goats (Gerstel-Raban, in press). Thus spherulites should be present in dung accumulations.

Gray powdery phytolith-rich layers have phytolith assemblages that are burnt and they contain dung spherulites. Micromorphological analysis shows that the gray color is due to the presence of charcoal. Their presence indicates that dung may have been burnt as fuel and that its ash was dumped at the localities studied here. The presence of small domains of microlaminated structure is puzzling, as we do not expect it to preserve if the dung ash is re-deposited. The other possibility is that the dung was burnt *in situ* and that its structure collapsed into the many voids evident in these gray sediments (see micromorphological descriptions above). However the phytolith assemblages in the gray sediments differ from those in the white layers at the same localities. This is consistent with the gray sediment not being burnt *in situ*. Moreover, the presence of microlaminated domains together with high porosity in the gray sediments indicates that these sediments were not trampled after deposition as this would probably destroy the lamination and reduce the porosity. It seems that the white and gray layers reflect different uses of the same area, albeit, at least in some areas, both involving animal dung. Note however, that we observed one thin phytolith-rich gray layer (Fig. 2d layer number 3) whose structure was microlaminated throughout, probably indicating that it was burnt *in situ*.

The absence of phytoliths from reeds or from palm trees implies that none of the phytolith-rich layers we have sampled to date are derived from matting. The mix of wild and domestic grasses is also inconsistent with the phytoliths being derived from thatched roofing, which is usually built from the stems of domesticated cereals.

##### 4.1. Taphonomic implications

In the area G locality 2, all the phytolith-rich and associated layers slope sharply upwards towards the walls (Fig. 8). This

Table 5  
 Summary of main results obtained for each of the six studied localities

Locality	Archaeological context	Macroscopic features	Microlaminated?	Burnt?	Spherulites	Domestic vs. wild	Inferred activity
Area G: 1	Bronze Age, open area	5–30 cm thick series of white sediment	Yes	No	Yes	D + W	Long term livestock penning
Area G: 2	Iron Age, small room related to a large residential building	5 cm of brown sediment incorporating two separated white layers ca. 0.5 cm thick each	Yes	No	No	D	No parsimonious explanation
Area D5	Iron Age, probably courtyard related to a building	A series of thin white or gray layers alternating within brown sediment	Yes	White, no; gray, yes	Yes	D + W	Short episodes of livestock penning, occasional burning.
Area D2: 1	Iron Age, open area	White layer 2–3 cm thick	No	No	Yes in 1 white layer	D + W	Redeposited dung; trash or dung-cake preparation area? Burned dung
Area D2: 2	Iron Age, open area, series of pits	Gray powdery layer, variable thickness	Yes (in domains)	Yes	Yes	D + W	Redeposited dung; trash or dung-cake preparation area? Burned dung
		White layer 2–4 cm thick	No	No	Yes, lesser amount	D + W	
Area D2: 3	Assyrian period, open area, a large trash pit	Gray powdery layer, variable thickness	Yes (in domains)	Yes	Yes	D + W	Redeposited dung; trash or dung-cake preparation area? Burned dung
		White layer 2–3 cm	Yes	No	Yes, lesser amount	D + W	

D, domestic grasses (possibly wheat); W, wild grasses.

could be due to subsidence of the floors. In fact if other phytolith-rich layers are present deeper in the section, this would explain why the floors found directly under the phase G/9 mud-brick collapse seem to reach a phase G/10 wall. In area D5, the phytolith-rich layers as well as the associated layers have arc-like subsidence features which correlate with existing robber-trenches. Thus the compression of the organic-rich sediments presumably followed the underlying topography defined by the robber trenches. In area D2 locality 2 the phytolith-rich layer also followed the pre-existing pit topography and at one location was almost vertical. In locality 1 they were draped over the surface of a series of large rocks, which must have been under the organic-rich sediments. All these phenomena can be explained by the taphonomic degradation of a thick organic-rich layer that leaves a relatively thin residue on the substrate. Such large volume reductions of organic-rich sediments can result in artefacts changing their stratigraphic positions relative to the architecture. They can also cause concentrations of artefacts that were originally separated.

#### 4.2. Cultural implications

Phytolith-rich layers were found at Dor in open spaces between houses, courtyards within houses, roofed spaces within

houses, refuse pits, and even in monumental public structures. Their presence on the *tell* indicates an intimate association between humans, animals, plants and bio-waste products, such as chaff, straw, unconsumed animal fodder, and animal dung during the Late Bronze Age and Iron Age. Thus open lots and/or unoccupied structures within the town were used as animal enclosures or for the disposal of organic-rich waste products. This may well have implications for estimating population size from the site area, herd size for individual enclosures or even the very assumption of a “stratum”, namely that all structures within the stratum were in use at the same time.

A broader question arises from the association between humans, animals and plants in an urban context. It is noteworthy that all of the ethnographic parallels referred to in the introduction are from agro-pastoralist villages. In towns in the present-day Near East, even traditional ones, animal and vegetal materials are mainly introduced as more-or-less processed consumer goods. Thus the patterns of co-habitation of humans with animals, their food and their dung are significantly different than that observable in villages. Dor however was an urban center throughout the period under study. Indeed, in one of the sub-periods, the Iron Age I, a ‘dark age’ around the entire Mediterranean, Dor is one of the few flourishing urban centers, boasting massive fortifications and monumental public structures.

Chronologically the phytolith-rich layers range from the Late Bronze Age (13th/12th century BCE) to the end of the Iron Age (7th century BCE). Although we have not systematically surveyed all exposures on the *tell*, phytolith-rich layers are almost totally absent in the later Persian, Hellenistic and Roman strata. This in turn might indicate a major change in the urban environment following the Iron Age, and perhaps the very definition of a city (*urbis*) itself. Some time between the end of the Iron Age and the onset of the Hellenistic period, a dichotomy was created between 'village', where agricultural goods are produced and humans cohabit with animals, plants, and their waste products, and 'city' as the realm of a consumer society. There are clues that this indeed may be the case. For instance, it has often been noted that biblical Hebrew has no word to denote 'village'. Any habitation larger than an isolated farm is a 'town'. Mishnaic Hebrew (i.e., during the Roman period) already possesses a separate word for 'village'.

Archaeologists are used to thinking in terms of a single 'urban revolution', which happened in the case of the Levant at the beginning of the third millennium BCE. It consisted of the nucleation of settlements in which supra-subsistence activities (trade, storage and re-distribution, craftsmanship, ritual, government, etc.) are centered. Our evidence suggests that in Dor at least, households remained a locus of primary food production, with the attendant biogenic wastes. This is also indicated by a recent analysis of the early Iron Age faunal assemblage of area D2 (Gerstel-Raban, *in press*), in which parameters like the distribution of (mostly domesticated) animals, age and gender distribution, body-part representation, butchering, filleting and skinning marks, and more, indicate that meat was not only consumed at Dor, but also produced there. If the observations at Dor are representative for these periods, then the second 'urban revolution' which pushed primary food production and its wastes out of the town altogether or at least proscribed it to specific spaces (markets, public stables, etc.), might have coincided with the Hellenization of the Levant. (See for example Morris (1991, p. 40) and Whitley (2001, p. 174) for a similar and largely contemporaneous process in Greece, i.e., 'real' urban space taking shape not before the late 6th century BCE.) It is clear that the elucidation of the physical and social matrix which we customarily designate as an early Levantine town or city will have to reach beyond architectural analyses (Herzog, 1997).

## 5. Conclusions

This study shows that layers composed mainly of phytoliths can form. At Tel Dor they are for the most part the product of the break down of animal dung. This dung accumulated either in animal enclosures, or was redeposited under circumstances that are not well understood. The transformation of the dung accumulation into a relatively thin layer of phytoliths is accompanied by significant reduction in volume and hence can cause subsidence of the overlying strata. This may complicate stratigraphic relations in the field. Finally the identification of many such dung accumulations and hence animal

enclosures on the *tell*, raises questions about the style of life of the *tell* inhabitants during these periods and the nature of urbanism at this time.

## Acknowledgements

We thank the area supervisors Elizabeth Bloch-Smith, Willem Boshoff, Yiftah Shalev and Avshalom Karasik. We also thank the Berman Center for Biblical Archaeology, Mr George Schwartzmann, Sarasota, Florida, and the Kimmel Center for Archaeological Science for their financial support. R.S.G. would like to thank Liora Kolska-Horowitz for providing a sample of dung plastered wall from South Africa, reported in this study. S.W. is the incumbent of the Dr Trude Burchardt Professorial Chair of Structural Biology. The Fundació Atapuerca financed the research performed by D. Cabanes.

## References

- Albert, R.M., Lavi, O., Estroff, L., Weiner, S., Tsatskin, A., Ronen, A., Lev-Yadun, S., 1999. Mode of occupation of Tabun Cave, Mt Carmel, Israel during the Mousterian period: a study of the sediments and phytoliths. *Journal of Archaeological Science* 26, 1249–1260.
- Albert, R.M., 2000. Study of Ash Layers through Phytolith Analyses from the Middle Paleolithic Levels of Kebara and Tabun Cave (Israel). University of Barcelona, p. 250.
- Albert, R.M., Weiner, S., 2001. Study of phytoliths in prehistoric ash layers using a quantitative approach. In: Meunier, J.D., Colin, F. (Eds.), *Phytoliths: Applications in Earth Sciences and Human History*. A.A. Balkema Publishers, Lisse, Netherlands; Exton, PA, pp. 251–266.
- Aurenche, O., 1981. *La Maison. Orientale: l'Architecture du Proche Orient Ancien des Origines au Milieu du Quatrième Millénaire*. P. Geuthner, Paris.
- Ball, T.B., Gardner, J.S., Anderson, N., 1999. Identifying inflorescence phytoliths from selected species of wheat (*Triticum monococcum*, *T. dicoccum*, *T. dicoccoides*, and *T. aestivum*) and barley (*Hordeum vulgare* and *H. spontaneum*) (*Gramineae*). *American Journal of Botany* 86, 1615–1623.
- Bamford, M.K., Albert, R.M., Cabanes, D., 2006. Plio-Pleistocene macroplant fossil remains and phytoliths from Lowermost Bed II in the eastern palaeolake margin of Olduvai Gorge, Tanzania. *Quaternary International* 148, 95–112.
- Berlin, A.M., Ball, T., Thompson, R., Herbert, S.C., 2003. Ptolemaic agriculture, "Syrian wheat", and *Triticum aestivum*. *Journal of Archaeological Science* 30, 115–121.
- Berna, F., Behar, A., Shahack-Gross, R., Berg, J., Boaretto, E., Gilboa, A., Sharon, I., Shalev, S., Shilstein, S., Yahalom-Mack, N., 2007. Sediments exposed to high temperatures: reconstructing pyrotechnological processes in Late Bronze and Iron Age Strata at Tel Dor (Israel). *Journal of Archaeological Science* 34, 358–373.
- Borowski, O., 1987. *Agriculture in Iron Age Israel*. Eisenbrauns, Winona Lake, IN.
- Brochier, J.E., Villa, P., Giacomarra, M., Tagliacozzo, A., 1992. Shepherds and sediments – geo-ethnoarchaeology of pastoral sites. *Journal of Anthropological Archaeology* 11, 47–102.
- Brown, D.A., 1984. Prospects and limits of a phytolith key for grasses in the Central United-States. *Journal of Archaeological Science* 11, 345–368.
- Bullock, P., 1985. *International Society of Soil Science, Handbook for Soil Thin Section Description*. Waine Research, Albrighton.
- Canti, M.G., 1997. An investigation of microscopic calcareous spherulites from herbivore dungs. *Journal of Archaeological Science* 24, 219–231.
- Canti, M.G., 1998. The micromorphological identification of faecal spherulites from archaeological and modern materials. *Journal of Archaeological Science* 25, 435–444.



- Canti, M.G., 1999. The production and preservation of faecal spherulites: animals, environment and taphonomy. *Journal of Archaeological Science* 26, 251–258.
- Courty, M.A., Goldberg, P., Macphail, R., 1989. *Soils and Micromorphology in Archaeology*. Cambridge University Press, Cambridge and New York.
- Elbaum, R., Weiner, S., Albert, R.M., Elbaum, M., 2003. Detection of burning of plant materials in the archaeological record by changes in the refractive indices of siliceous phytoliths. *Journal of Archaeological Science* 30, 217–226.
- Gerstel-Raban, N., Bar-Oz, G., Zohar, I., Sharon, I., Gilboa, in press. Early Iron Age Dor (Israel): A Faunal Perspective. *Bulletin of the American Schools of Oriental Research*.
- Gilboa, A., 2005. Sea Peoples and Phoenicians along the southern Phoenician Coast, a reconciliation: an interpretation of SKL material culture. *Bulletin of the American Schools of Oriental Research* 337, 47–78.
- Gilboa, A., Sharon, I., 2003. An archaeological contribution to the Early Iron Age chronological debate: alternative chronologies for Phoenicia and their effects on the Levant, Cyprus, and Greece. *Bulletin of the American Schools of Oriental Research* 332, 7–80.
- Herzog, Z., 1997. *Archaeology of the City: Urban Planning in Ancient Israel and its Social Implications*. Emery and Claire Yass Archaeology Press, Tel Aviv.
- Kamp, K., 2000. From village to tell: household ethnoarchaeology in Syria. *Near Eastern Archaeology* 63, 84–93.
- Kramer, C., 1982. *Village Ethnoarchaeology: Rural Iran in Archaeological Perspective*. Academic Press, New York.
- Macphail, R.I., Cruise, G.M., Allen, M.J., Linderholm, J., Reynolds, P., 2004. Archaeological soil and pollen analysis of experimental floor deposits; with special reference to Butser Ancient Farm, Hampshire, UK. *Journal of Archaeological Science* 31, 175–191.
- Madella, M., Alexandre, A., Ball, T., Group, I.W., 2005. International code for phytolith nomenclature 1.0. *Annals of Botany* 96, 253–260.
- Miller, N.F., 1984. The use of dung as fuel: an ethnographic example and an archaeological interpretation. *Paléorient* 10, 71–79.
- Morris, I., 1991. The early polis as city and state. In: Rich, J., Wallace-Hadrill, A. (Eds.), *City and Country in the Ancient World*. Routledge, London and New York, pp. 25–58.
- Mullholland, S.C., Rapp Jr., G., 1992. A morphological classification of grass silica-bodies. In: Rapp, G.R., Mullholland, S.C. (Eds.), *Phytolith Systematics: Emerging Issues*. Plenum Press, New York, pp. 65–89.
- Pearsall, D.M., Piperno, D.R., Dinan, E.H., Umlauf, R., Zhao, Z.J., Benfer, R.A., 1995. Distinguishing rice (*Oryza-Sativa Poaceae*) from wild *Oryza* species through phytolith analysis – results of preliminary research. *Economic Botany* 49, 183–196.
- Piperno, D.R., 2006. *Phytoliths: A Comprehensive Guide for Archaeologists and Paleoecologists*. AltaMira Press, Lanham, MD, p. 238.
- Piperno, D.R., Pearsall, D.M., 1993. Phytoliths in the reproductive structures of maize and Teosinte – implications for the study of maize evolution. *Journal of Archaeological Science* 20, 337–362.
- Reddy, S.N., 1997. If the threshing floor could talk: integration of agriculture and pastoralism during the Late Harappan in Gujarat, India. *Journal of Anthropological Archaeology* 16, 162–187.
- Reddy, S.N., 1998. Fueling the hearths in India: the role of dung in Paleoethnobotanical interpretation. *Paléorient* 24, 61–70.
- Rosen, A.M., 1992. Preliminary identification of silica skeletons from Near Eastern archaeological sites: an anatomical approach. In: Rapp, G.R., Mullholland, S.C. (Eds.), *Phytolith Systematics: Emerging Issues*. Plenum Press, New York, pp. 129–147.
- Rosen, A.M., 1993. Phytolith evidence for early cereal exploitation in the Levant. In: Pearsall, D.M., Piperno, D.R. (Eds.), *Current Research in Phytolith Analysis: Applications in Archaeology and Paleoecology*. MASCA, The University Museum of Archaeology and Anthropology, University of Pennsylvania, Philadelphia, pp. 160–171.
- Rosen, A.M., Weiner, S., 1994. Identifying ancient irrigation – a new method using opaline phytoliths from Emmer Wheat. *Journal of Archaeological Science* 21, 125–132.
- Roth, Y., 1985. *Survey of the Southern Golan*. Eretz Israel Museum Publication, Tel Aviv.
- Schiegl, S., Goldberg, P., Bar-Yosef, O., Weiner, S., 1996. Ash deposits in Hayonim and Kebara caves, Israel: macroscopic, microscopic and mineralogical observations, and their archaeological implications. *Journal of Archaeological Science* 23, 763–781.
- Shahack-Gross, R., Marshall, F., Weiner, S., 2003. Geo-ethnoarchaeology of pastoral sites: the identification of livestock enclosures in abandoned Maasai settlements. *Journal of Archaeological Science* 30, 439–459.
- Shahack-Gross, R., Marshall, F., Ryan, K., Weiner, S., 2004. Reconstruction of spatial organization in abandoned Maasai settlements: implications for site structure in the Pastoral Neolithic of East Africa. *Journal of Archaeological Science* 31, 1395–1411.
- Shahack-Gross, R., Albert, R.M., Gilboa, A., Nagar-Hilman, O., Sharon, I., Weiner, S., 2005. Geoarchaeology in an urban context: the uses of space in a Phoenician monumental building at Tel Dor (Israel). *Journal of Archaeological Science* 32, 1417–1431.
- Sharon, I., Gilboa, A., Jull, A.J.T., Boaretto, E., 2005. The Early Iron Age dating project: introduction, methodology, progress report and an update of the Tel Dor dates. In: Levy, T.E., Higham, T. (Eds.), *The Bible and Radiocarbon Dating: Archaeology, Text and Science*. Equinox Publishers, London and Oakville, CT, pp. 65–92.
- Sharon, I., Gilboa, A., in press. The SKL town: Dor in the Early Iron Age. In: Artzy, M., Killebrew, A.E. (Eds.), *Philistines and Other Sea Peoples*. Brill, Leiden.
- Tsartsidou, G., Lev-Yadun, S., Albert, R.M., Rosen, A., Efstratiou, N., Weiner, S., in press. The phytolith archaeological record: strengths and weaknesses evaluated based on a quantitative modern reference collection from Greece. *Journal of Archaeological Science*.
- Turkowski, L., 1969. Peasant agriculture in the Judean hills. *Palestine Exploration Quarterly*, 101–112.
- Twiss, P.C., Suess, E., Smith, R.M., 1969. Morphological classification of grass phytoliths. *Soil Science Society of America Proceedings* 33, 109–115.
- Watson, P.J., 1979. *Wenner-Gren Foundation for Anthropological Research, Archaeological Ethnography in Western Iran*. University of Arizona Press, Tucson, AZ.
- Whitley, J., 2001. *The Archaeology of Ancient Greece*. Cambridge University Press, New York.
- Whittaker, J.C., 2000. Alonia and Dhoukanes: the ethnoarchaeology of threshing in Cyprus. *Near Eastern Archaeology* 63, 62–69.
- Zhao, Z.J., Pearsall, D.M., Benfer, R.A., Piperno, D.R., 1998. Distinguishing rice (*Oryza sativa poaceae*) from wild *Oryza* species through phytolith analysis, II: Finalized method. *Economic Botany* 52, 134–145.
- Ziadeh-Seely, R., 1999. Abandonment and site formation processes: an ethnographic and archaeological study. In: Glock, A.E., Kapitan, T. (Eds.), *Archaeology, History and Culture in Palestine and the Near East: Essays in Memory of Albert E. Glock*. Scholars Press, Atlanta, GA, pp. 127–150.

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI

L'ESTUDI DELS PROCESSOS DE FORMACIÓ DELS SEDIMENTS ARQUEOLÒGICS

I DELS PALEOSÒLS A PARTIR DE L'ANÀLISI DELS FITÒLITS , ELS MINERALS I ALTRES MICRORESTES

Dan Cabanes i Cruelles

ISBN:978-84-692-1535-7/DL-T-378-2009

## **8. Discussió**

**153**

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI

L'ESTUDI DELS PROCESSOS DE FORMACIÓ DELS SEDIMENTS ARQUEOLÒGICS

I DELS PALEOSÒLS A PARTIR DE L'ANÀLISI DELS FITÒLITS , ELS MINERALS I ALTRES MICRORESTES

Dan Cabanes i Cruelles

ISBN:978-84-692-1535-7/DL-T-378-2009

En els jaciments que s'han presentat en aquest treball totes les anàlisis de fitòlits han estat acompanyades de l'anàlisi dels components minerals bàsics amb FTIR; la combinació entre aquestes dues aproximacions en l'estudi dels sediments arqueològics ha estat la base metodològica que ens ha permès fer interpretacions dels processos de formació a través dels fitòlits, encara que, com s'ha demostrat, també s'han de tenir en compte altres factors per a poder realitzar una interpretació més acurada dels esdeveniments que configuren els jaciments.

Aquesta aproximació conjunta, fitòlits i FTIR, es porta desenvolupant des dels anys noranta. En un primer moment, les investigacions es van concentrar en els jaciments paleolítics de l'àrea del Mont Carmel i les seves proximitats (Israel); en aquests casos s'investigà quin era el combustible emprat en els fogars, com s'alteren els fitòlits, quins eren els processos diagenètics que van afectar a les cendres i, finalment, quines eren les implicacions arqueològiques i estratigràfiques de tot plegat (Schiegl *et al.*, 1994; Weiner *et al.*, 1995; Schiegl *et al.*, 1996; Albert *et al.*, 1999; Albert, 2000; Albert i Weiner, 2001; Albert *et al.*, 2003; Karkanas *et al.*, 2007). Posteriorment aquest tipus d'investigacions es va estendre fora del nucli de jaciments paleolítics israelians, i ho va fer ampliant el marc cronològic i regional (Portillo *et al.*, en premsa; Karkanas *et al.*, 2002; Albert i Henry, 2004; Karkanas *et al.*, 2004; Schiegl *et al.*, 2004; Shahack-Gross *et al.*, 2005; Karkanas, 2006). En els darrers anys, fins i tot s'han arribat a desenvolupar investigacions que s'integren dintre de l'àmbit de l'etnografia i l'etnoarqueologia. (Shahack-Gross *et al.*, 2003; Shahack-Gross *et al.*, 2004b; Tsartsidou *et al.*, 2007; Tsartsidou *et al.*, 2008). Les publicacions que formen el cos central d'aquest treball s'haurien d'emmarcar per les cronologies investigades i la situació dels jaciments analitzats dintre del grup de treballs que expandeixen l'estudi dels fitòlits combinat amb el FTIR fora dels jaciments paleolítics israelians (Albert *et al.*, en premsa; Cabanes

*et al.*, en premsa; Albert *et al.*, 2006; Bamford *et al.*, 2006; Cabanes *et al.*, 2007; Albert *et al.*, 2008). Entre d'altres ítems, és en aquest moment quan es va desenvolupar la metodologia per poder realitzar les quantificacions de fitòlits en els sediments, independentment del seu estat de preservació (Albert *et al.*, 1999; Albert i Weiner, 2001), i quan també es van identificar els processos diagenètics implicats en la preservació o alteració dels sediments antròpics (cendres) i que afecten a la preservació de la resta de materials arqueològics (Weiner i Bar-Yosef, 1990; Weiner *et al.*, 1993; Weiner *et al.*, 1995; Karkanas *et al.*, 2000; Weiner *et al.*, 2002).

Tot i que els resultats obtinguts en aquestes investigacions es poden utilitzar per fer inferències directes sobre els processos de formació, sobretot aquells de caire postdeposicional i que afecten als fitòlits i als sediments, l'objectiu principal d'aquests treballs no era estudiar des de la perspectiva dels fitòlits els processos de formació. A més s'ha de tenir en compte que totes aquestes investigacions s'havien centrat fins al moment en un tipus de jaciment (cova), cronologia (Paleolític Mitjà o Superior) i regió (Nord d'Israel) molt específic i per tant qualsevol comprovació de les hipòtesis referents a la utilització dels fitòlits per estudiar la formació dels jaciments arqueològics, i plantejades en aquesta tesi, només serien vàlides per a aquest tipus de jaciments i no es podrien extrapolar a altres jaciments, cronologies o regions.

Aquesta tesi presenta un pas més en el camí iniciat durant els anys noranta des de l'equip del Weizmann Institute. En el nostre cas la transversalitat cronològica i regional aporta noves dades que permeten entendre la relació dels fitòlits amb els processos de formació des d'una altra perspectiva, i d'aquesta forma, comprendre quin és el potencial, els avantatges i els límits de l'estudi dels fitòlits dintre d'aquest camp. Les diferents condicions en les que s'han format els jaciments estudiats, així com el diferent grau d'antropització al que han estat sotmesos, fa que la informació que se n'extreu variï molt dels uns als altres. Tot i això, es mostren uns trets comuns que ens serveixen de guia per a utilitzar els fitòlits en l'estudi dels processos de formació de qualsevol jaciment arqueològic en el que aquestes microrestes hi siguin presents.

## 8.1. Discussió per jaciments

### 8. 1. 1. La Gorja d'Olduvai

En aquest jaciment es van estudiar els nivells superiors de la Bed I i els inferiors de la Bed II per tal de determinar amb major exactitud els paràmetres ambientals que van afectar l'evolució dels primers *Homo* i els *Paranthropus* contemporanis a aquests. Si bé l'objectiu principal d'aquestes investigacions era fer una reconstrucció de la vegetació dominant durant la formació d'aquests nivells, la forma en que es va dur a terme la investigació ens permet fer inferències sobre com funciona la deposició de fitòlits en un medi natural, el qual no ha estat alterat de forma significativa per les activitats antròpiques.

Les investigacions realitzades a la zona d'Olduvai determinen les característiques bàsiques d'una acumulació de fitòlits d'origen natural i, d'aquesta manera, es poden diferenciar aquests tipus d'acumulacions naturals d'aquelles acumulacions de fitòlits que tenen el seu origen en les activitats humanes.

La definició dels trets d'una acumulació natural de fitòlits en un context paleontològic o arqueològic passa per comprendre com funciona l'acumulació i la preservació dels fitòlits en un paleosòl, i quines són les diferències que s'hi poden esperar respecte als altres registres paleobotànics, com és el cas de les macrorestes silificades d'Olduvai. En el nostre treball els fitòlits s'han classificat morfològicament, i sobretot, s'han quantificat ja que d'aquesta forma es pot obtenir una millor definició dels aspectes que envolten la seva deposició en els sòls, però també s'ha estudiat la mineralogia dels sediments ja que així s'identifiquen els processos diagenètics que poden afectar als fitòlits.

Pel que fa a l'acumulació i la preservació dels fitòlits en els paleosòls hi ha dos factors essencials que determinaran les característiques finals de l'espectre de fitòlits: En primer lloc, el procés de producció dels fitòlits i la seva deposició en el sòl mentre les plantes són vives i el sòl es continua desenvolupant. En segon lloc, els processos tafonòmics de caire postdeposicional que afecten a la preservació dels fitòlits al llarg del temps i que es produeixen un cop el sòl està enterrat.

#### **El procés de producció dels fitòlits i la seva deposició en el sòl**

Per estudiar el procés de producció de fitòlits i la seva deposició durant la formació del sòl s'ha dut a terme un treball de caire actualista que defineix les condicions d'aquesta deposició, i quins són els agents tafonòmics que afecten als fitòlits de forma immediata. Així doncs, els treballs realitzats tant en plantes com en sòls actuals en els jaciments africans han mostrat com funciona la transferència de fitòlits des de la seva formació, en la planta, fins que queden

dipositats en el sòl. En aquest cas es va tenir en compte tota una sèrie de circumstàncies que ocasionalment poden ser difícils d'identificar a partir dels fitòlits extrets dels paleosòls; es tracta d'elements com el transport de les plantes o la pressió dels herbívors sobre una part específica del vegetal (Fredlund i Tieszen, 1994). D'altra banda, hi ha una altra sèrie de factors als quals es va fer una aproximació a través del treball amb mostres contemporànies; entre d'altres, hi ha elements com el cicle vital de la planta (perennes vs anuals) o la producció diferencial de fitòlits, tant a nivell morfològic com quantitatiu, depenent de l'origen anatòmic d'aquests (fulles, inflorescència, tronc, etc.).

Els resultats obtinguts a partir de les investigacions realitzades amb els sòls actuals aporten un concepte bàsic per entendre els processos de formació natural a través dels fitòlits: No tots els fitòlits que produeixen les plantes es preserven en els sòls actuals on creixen aquestes plantes. La preservació diferencial dels fitòlits en els sòls es deu sobretot a la dissolució de les morfologies més "febles", la qual és conseqüència de la utilització dels fitòlits com a font de silici per part de les plantes que creixen en els sòls. Aquesta dissolució dels fitòlits durant la gènesi del sòl s'interpreta com un procés tafonòmic de caire immediat, el qual es produeix poc després de la deposició dels fitòlits en el sòl i mentre la cobertura vegetal encara és present. Investigacions precedents a les desenvolupades a la Gorja d'Olduvai ja havien suggerit que no tots els fitòlits que produeixen les plantes es preserven en els sòls (Piperno, 1988; Fredlund i Tieszen, 1994; Fredlund i Tieszen, 1997a; Thorn, 2004b), i en conseqüència no es pot esperar que tots els fitòlits que ha produït la vegetació del passat es preservin en els paleosòls. En alguns d'aquests treballs s'assenyala la importància de poder comparar els fitòlits de plantes actuals amb els fitòlits que es troben als sòls on creixen aquestes plantes per tal de poder identificar millor quins són els fitòlits que sobreviuen en els sòls estudiats (Piperno, 2006). Segons aquests investigadors alguns dels motius que originen les diferències entre la producció de fitòlits en les plantes actuals i la seva preservació en els sòls moderns estan en relació amb el transport dels fitòlits i donen com a exemple les conseqüències dels focs naturals o la pressió dels herbívors; però també aquestes diferències es poden donar degut a l'herència en els sòls de fitòlits més antics i que han estat produïts per plantes que ja no colonitzen els sòls analitzats (Fredlund i Tieszen, 1994; Fredlund i Tieszen, 1997a; Thorn, 2004b; Piperno, 2006). Tot i que aquests dos fets (transport de fitòlits i herència en els sòls) han estat contrastats empíricament s'ha de tenir en compte que aquests models mostren certes incoherències; per exemple, alguns d'aquests investigadors consideren que, principalment, degut a la naturalesa i funció dels fitòlits en les plantes, la deposició d'aquests es produeix *in situ* i els desplaçaments previs a la deposició no són significatius, exceptuant casos en condicions molt específiques (Piperno, 2006). D'altres admeten que hi ha diferències en la supervivència dels fitòlits un cop dipositats en els sòls, però els seus resultats semblen mostrar una bona preservació immediata dels fitòlits (Thorn, 2004b). Majoritàriament les diferències entre la producció i la preservació dels fitòlits que es detecten en els sòls actuals, almenys per al cas d'Olduvai, no correspondrien a un transport diferenciat d'aquests, ni a l'herència del sòl ja que estem analitzant els sediments més superficials, sinó a una dissolució pràcticament immediata dels fitòlits dipositats; encara que també s'ha de tenir en compte la pressió dels herbívors que poden haver influït en la desaparició de certes morfologies que només estan limitades en una part específica de la planta. A més a més, tal i com hem demostrat en el present treball, aquesta dissolució es dona independentment de la composició mineralògica dels sòls, almenys en els moments més immediats a la deposició dels fitòlits ja que un cop aquests han estat enterrats la composició mineral dels sediments sí que influeix en la seva preservació. En aquest sentit, creiem que el factor que més influeix en la preservació dels



fitòlits en els sòls actuals és el reciclatge actiu dels fitòlits per part de les plantes que creixen en els sòls. Entenem per “reciclatge actiu dels fitòlits” la preferència de les plantes en fer servir els fitòlits dipositats prèviament com a font de silici en els sòls on creixen (Alexandre *et al.*, 1997a; Farmer, 2005; Farmer *et al.*, 2005; Gérard *et al.*, 2008).

Val a dir però, que en la Gorja d'Olduvai també hem detectat processos abiòtics que modifiquen la disposició dels sediments, i que en conseqüència també modifiquen la disposició original dels fitòlits. Entenem que aquests processos no afecten als fitòlits de forma individual sinó que afecten a tot el conjunt sedimentari, i per tant no es podrien considerar com un procés responsable del transport de fitòlits de forma individualitzada que podria afectar el registre final. Entre aquests processos trobem el transport de fitòlits i sediments a la mostra moderna extreta del riu o les fluctuacions de l'antic llac en les mostres de VEK. Pel que fa a la mostra moderna de la vora del riu, es van determinar fitòlits que es van dipositar inicialment en altres zones degut a que aquests es desplacen amb el moviment dels sediments on s'han dipositat a favor de la pendent. Zucol (2005) proposa definir l'origen primari o secundari dels fitòlits depenent de l'alteració de la superfície d'aquests, ja que se suposa una erosió amb depressions en la superfície del fitòlit per a aquells conjunts de fitòlits que han estat transportats. Amb tot, aquest autor no considera la possibilitat d'una alteració química *in situ*, produïda per l'absorció del silici contingut en els fitòlits per les mateixes plantes que formen el sòl (Alexandre *et al.*, 1997a; Farmer, 2005; Farmer *et al.*, 2005; Gérard *et al.*, 2008), o fins i tot una alteració postdeposicional deguda a l'augment del pH cap a condicions més bàsiques (Albert *et al.*, 1996; Albert *et al.*, 2000; Piperno, 2006). Si bé ambdues hipòtesis (alteració pel transport i alteració química) són factibles, només el coneixement dels medis sedimentaris, tant a través de la mineralogia com a través de la geoarqueologia, ens permetrà discernir l'origen d'aquestes alteracions i millorar les inferències relacionades amb la paleoecologia, i sobretot amb els processos de formació.

Un dels aspectes que s'ha de tenir en compte a l'hora d'interpretar els biaixos tafonòmics immediats és la producció diferencial de fitòlits, tant en nombre com en morfologies, per part dels diferents tipus de plantes. En el cas d'Olduvai hem vist que els fitòlits de l'escorça i la fusta de les dicotiledònies són més estables en els sòls actuals que alguns dels fitòlits de plantes monocotiledònies. No obstant, la producció de fitòlits en aquest darrer grup és molt més gran que en plantes dicotiledònies, i això es veu reflectit en l'estimació de fitòlits per gram de matèria orgànica. Paral·lelament, al tractar-se de plantes anuals, aquestes dipositen més fitòlits que no pas les plantes perennes dicotiledònies que formen els fitòlits de fusta i escorça, i que tarden més en morir. L'aportació diferencial quant al nombre i tipus de fitòlits als sòls depenent del tipus de planta fins i tot es produeix entre plantes molt similars, com en el cas de la família de les palmàcies; en el capítol 4.3 es pot observar com en conjunt la *Phoenix reclinata* té una pèrdua de fitòlits més gran que la *Hyphaene petersiana* quan aquests fitòlits passen de la planta al sòl. Aquest aspecte ha estat molt treballat anteriorment i s'havia utilitzat per corregir les interpretacions paleoecològiques, però evidentment, també es pot utilitzar per corregir les inferències tafonòmiques (Twiss *et al.*, 1969; Mulholland *et al.*, 1988; Piperno, 1988; Ollendorf, 1992; Fredlund i Tieszen, 1994; Albert, 2000; Krishnan *et al.*, 2000; Piperno *et al.*, 2000; Albert i Weiner, 2001; Thorn, 2004b; Blinnikov, 2005; Piperno, 2006; Tsartsidou *et al.*, 2007). Hi ha biaixos tafonòmics que afavoreixen la preservació de certes morfologies de fitòlits per sobre d'unes altres, segurament degut en part al grau de silificació de la planta (Rosen i Weiner, 1994; Albert, 2000; Albert i Weiner, 2001; Piperno, 2006).

## Processos tafonòmics de caire postdeposicional

Un dels processos tafonòmics de caire postdeposicional que més afecta a la preservació dels fitòlits en la Gorja d'Olduvai és la seva dissolució, o alteració química, deguda principalment a pH bàsics. En el nostre cas aquesta alteració química ha estat inferida a partir dels resultats del FTIR. Un exemple d'això és la relació entre la presència de calcita i l'alteració dels fitòlits; en les mostres dels paleosòls analitzades en la Gorja d'Olduvai la presència de nòduls de calcita d'origen postdeposicional sempre va acompanyada d'un increment dels fitòlits alterats. Els canvis del pH en el sòl i els sediments molt sovint vénen acompanyats de la redistribució de certs elements químics, com el carbonat de calç, i pot provocar la reprecipitació de la calcita com en el cas dels nòduls trobats a Olduvai. En jaciments a l'aire lliure amb processos de formació d'origen natural la presència d'aquesta calcita secundària és un clar indicador d'un procés postdeposicional de caire químic que afecta a la preservació dels fitòlits en els sediments. Un pH molt bàsic, acompanyat de la presència d'aigua, habitualment comporta la dissolució total o parcial del conjunt de fitòlits (Albert *et al.*, 1996; Piperno, 2006); és així com processos molt similars als ocorreguts en els sediments d'Olduvai s'han detectat en altres tipus de jaciment. Aquests jaciments poden tenir uns processos de formació molt diferents als registrats a la Gorja d'Olduvai, i fins i tot l'origen de la calcita també pot ser diferent, però a la pràctica els efectes sobre la preservació dels fitòlits són els mateixos. En jaciments com Kebara, Hayonim o la Grotte XVI la presència de calcita derivada de les cendres de fusta sempre sol estar relacionada amb un augment del nombre de fitòlits alterats, especialment en les zones on s'ha detectat una forta circulació hídrica (Albert *et al.*, 2000; Karkanas *et al.*, 2002; Albert *et al.*, 2003). En alguns casos l'origen d'aquesta calcita també pot ser una planxa estalagmítica que s'ha format després de la deposició dels fitòlits i la formació de la qual afecta directament a la preservació d'aquests elements degut a l'acció de l'aigua carbonatada amb un pH molt elevat (Albert *et al.*, 1996). Un cas similar seria el de l'Abric Romaní, que s'ha presentat en aquest treball, on el travertí que es forma per la precipitació del carbonat de calci contingut en l'aigua forma part del jaciment. Davant d'aquestes evidències s'ha de remarcar que els processos postdeposicionals que configuren l'espectre final dels fitòlits es poden produir independentment de l'origen d'aquests fitòlits, tant si són d'origen natural com si són d'origen antròpic.

## Fitòlits i macrorestes vegetals

A la Gorja d'Olduvai els resultats obtinguts a partir de les macrorestes silificades i els resultats obtinguts dels fitòlits han demostrat que dintre d'un ambient no antropitzat els fitòlits i les macrorestes vegetals representen escales temporals diferents. Tot i que en estudis similars no s'han observat diferències ecològiques entre el conjunt de macrorestes i els conjunts de fitòlits (Zucol *et al.*, 2005), els nostres resultats han indicat que els fitòlits i les macrorestes vegetals presenten una sèrie de divergències que poden causar dubtes a l'hora d'utilitzar els fitòlits per estudiar els processos de formació. Aquestes diferències només es poden entendre a partir del coneixement de la formació d'ambdós registres: Les acumulacions de fitòlits en medis naturals no són el resultat d'un esdeveniment aïllat sinó el fruit d'una estabilitat ambiental que permet la contínua deposició de fitòlits en el sòl, és a dir, tenen per definició una certa continuïtat temporal. Els conjunts de fitòlits recuperats dels nivells paleoantropològics són el resultat d'un cicle de mort, reproducció i creixement de les plantes determinat pels canvis ambientals. La

presència de macrorestes vegetals silificades és el resultat d'un transport i un enterrament ràpid de les plantes, les quals fossilitzen en un ambient ric en silici com és el cas de l'àrea d'Olduvai (Hay, 1976; Bamford, 2005).

La formació d'aquest tipus de restes també té un origen diferent: per una banda els fitòlits són el producte d'un procés de biomineralització (Perry *et al.*, 2007), pel qual una planta fa precipitar el silici en les seves cèl·lules mentre aquesta planta està viva. Per l'altra banda, les macrorestes vegetals silificades recuperades a la Gorja d'Olduvai són el resultat d'un procés tafonòmic i de fossilització que només es produeix un cop la planta ha mort i resta enterrada en un ambient ric en silici (Bamford *et al.*, 2006). Això explica perquè en el cas dels estudis realitzats a Olduvai no s'ha trobat una correlació entre els resultats obtinguts pels fitòlits i els obtinguts a partir de les macrorestes silificades.

### Paleosòls, fitòlits i processos de formació

En termes de processos de formació estem en condicions de confirmar que en un context natural es produeix una sobrerrepresentació immediata de fitòlits "resistents" en els sòls que augmenta a mesura que passa el temps i entren en joc processos postdeposicionals. Les diferències en la preservació més immediata dels fitòlits es poden resumir en tres punts, si es té en compte que la preservació de fitòlits depèn del grau de silificació de la planta:

1. Hi ha morfologies presents a les plantes que no es troben en els sòls.
2. Hi ha morfologies abundants en les plantes que no són abundants en els sòls, però que encara s'hi poden trobar.
3. Hi ha morfologies que no són molt abundants en les plantes, però que en canvi, un cop als sòls són estables i augmenta la seva quantitat pel pas dels cicles anuals.

La determinació dels components minerals a través del FTIR també ens ajuda a entendre processos que es van produir en el passat, abans de l'enterrament del sòl. En els treballs presentats hem vist com es donen variacions en el tipus i nombre de fitòlits sense que hi hagi variacions en la composició mineralògica bàsica dels sediments. Aquestes variacions impliquen que, en unes condicions de preservació similars, el tipus i nombre de fitòlits són diferents bé perquè hi ha certa variabilitat en la cobertura vegetal, o bé perquè les plantes sofreixen una pressió ecològica distinta depenent de la zona on es troben. A més a més, s'ha de tenir en compte, tal i com s'ha comentat anteriorment, que el grau de silificació de la planta influeix en la preservació de les morfologies dels fitòlits, i per tant un grau de silificació diferenciat en les plantes que han originat els fitòlits també s'ha de contemplar per entendre la posterior preservació en el sòl.

En un àmbit més teòric, la hipòtesi del context sistèmic descrita per Schiffer (1972), tal i com hem vist en el capítol 3.2., preveu l'existència d'una sèrie de localitzacions on una determinada activitat es realitza amb més freqüència, i per tant, s'espera trobar amb més probabilitat les restes d'aquesta activitat en dites àrees. En el cas de la Gorja d'Olduvai determinar el tipus de paisatge en el que els homínids vivien (bosc o sabana) ens ajudarà a entendre com van evolucionar i ens donarà informació sobre les zones en les que, preferentment, varen desenvolupar les seves activitats (Peters i Blumenschine, 1995; Blumenschine i Peters, 1998; Blumenschine *et al.*, 1999;

Blumenschine *et al.*, 2003). A més a més, això ens aporta informació sobre els homínids que van desenvolupar dites activitats (*Paranthropus* o *Homo*) així com les possibles diferències en la forma d'ocupar aquest hàbitat depenent de l'espècie.

El conjunt dels estudis realitzats a la Gorja d'Olduvai ens ha permès entendre millor la deposició i conservació dels fitòlits en un medi natural. És cert que en aquest cas concret els fitòlits no són un factor determinant per entendre els processos de formació de les Beds I i II de la Gorja d'Olduvai; els quals estan dominats per factors abiòtics, com ara l'activitat volcànica o la sedimentació lacustre (Hay, 1976). No obstant, les investigacions que hem dut a terme proporcionen les bases suficients per entendre el cicle dels fitòlits, des de la seva formació fins a la seva deposició en els sediments, així com els processos tafonòmics que permeten o no la conservació d'aquests microfòssils al llarg del temps. Aquests treballs defineixen amb exactitud quines són les característiques bàsiques d'una acumulació de fitòlits d'origen natural i, d'aquesta manera, podem diferenciar les acumulacions de fitòlits d'origen natural d'aquelles acumulacions de fitòlits que tenen el seu origen en les activitats humanes.

### 8.1.2. L'Abric Romaní

162

L'aplicació de les anàlisis de fitòlits i FTIR als fogars del nivell J de l'Abric Romaní permet fer inferències sobre els processos de formació, tant antròpics com naturals, que afecten a la preservació i l'alteració dels fogars. La novetat d'aquestes investigacions rau en que s'enfoca l'estudi dels processos de formació des de la perspectiva de l'arqueobotànica i no solament des de la perspectiva geoarqueològica. La interpretació dels processos que formen els fogars a partir dels estudis en fitòlits no hauria estat possible si no s'haguessin tingut en consideració una sèrie de treballs previs. En aquest sentit val la pena fer una breu revisió d'aquestes investigacions per entendre millor sobre quines bases estem realitzant les interpretacions dels resultats obtinguts a l'Abric Romaní.

Des dels anys noranta les anàlisis de fitòlits i de FTIR aplicades als sediments paleolítics han permès estudiar amb més detall les estructures de combustió de diferents jaciments del Pròxim Orient i d'Europa, així com la preservació dels ossos i els processos diagenètics responsables de la formació de minerals *in situ* (Weiner i Bar-Yosef, 1990; Weiner *et al.*, 1993; Karkanis *et al.*, 2000; Weiner *et al.*, 2002; Shahack-Gross *et al.*, 2004a). L'origen de molts d'aquests minerals autigènics (que es formen *in situ*) és la diagènesi de les cendres, la qual va ser estudiada per Schiegl *et al.* (1994; 1996). A partir de la composició mineral dels fogars de Hayonim i Kebara aquests investigadors van demostrar diferències en la preservació de les cendres que impliquen una reducció del volum dels sediments, i per tant una reinterpretació de l'estratigrafia arqueològica. En aquests treballs es va determinar que els agregats de silici són un dels principals components de la fracció menys soluble de les cendres, però en alguns dels seus experiments es va detectar una presència important de fitòlits i es va apuntar la possibilitat que aquests elements permetin determinar amb major exactitud els processos de formació dels fogars (Schiegl *et al.*, 1996).

A l'hora de comparar els resultats obtinguts en aquestes investigacions amb els resultats obtinguts a l'Abric Romaní s'han de tenir en compte una sèrie de condicionants. Les cendres dels fogars de l'Abric Romaní mostren en general una bona preservació mineral, o almenys no mostren signes d'alteració química. Tot i això, si s'hagués donat el cas de que les cendres hagin sofert una diagènesi similar a les dels jaciments israelians aquesta no hauria tingut els mateixos efectes: tant a Hayonim com a Kebara els minerals derivats de les cendres són un dels components principals dels sediments que formen la seqüència; això implica que l'aportació sedimentària antròpica és molt més alta en aquestes dues coves que en l'Abric Romaní, i per tant, la possible diagènesi de les cendres a l'Abric Romaní no hauria tingut els mateixos efectes que a Kebara o a Hayonim. A més a més, s'ha de tenir en compte que aquests autors van considerar la preservació de les cendres dels fogars en termes de dissolució química, i en menor mesura en termes de bioturbació. S'ha de pensar, però, que durant els moments de formació del registre arqueològic efectes com el "trampling" o el desplaçament dels sediments poden tenir un origen marcadament antròpic, i per tant, afectar de forma considerable a la compactació i preservació de les cendres dels fogars, així com a la distribució de les restes arqueològiques (Goldberg i Bar-Yosef, 1998).

Tenint en compte els aspectes de la diagènesi mineral detectats a Hayonim i Kebara, Albert *et al.* (1999) van desenvolupar un mètode per quantificar els fitòlits en els sediments arqueològics independentment de la diagènesi que han sofert, aquest mètode és el que s'ha utilitzat en el present treball. A Tabun es va intentar determinar quins eren els modes d'ocupació de la cova amb la quantificació i determinació dels fitòlits recolzada per una col·lecció de referència de les plantes que creixen actualment en la zona del jaciment (Albert *et al.*, 1999; Albert i Weiner, 2001). En aquest cas es tractava de precisar com es van formar les grans unitats estratigràfiques de la cova, en alguna de les quals s'hi havia detectat fogars, però no de contrastar les característiques dels fogars excavats en un sol nivell. Un dels principals avanços aconseguits en aquest treball va ser la identificació de restes de cendra en nivells on no s'havien identificat els fogars a ull nu, però també distingir entre focs antròpics i focs naturals. A la cova de Kebara també s'utilitzen els fitòlits i el FTIR per investigar la formació i preservació dels fogars (Albert *et al.*, 2000). En aquesta ocasió no es va poder correlacionar la quantitat de fitòlits en els sediments amb el color de la mostra, segurament degut a les condicions de diagènesi que es registren en aquest jaciment. En canvi sí que es va arribar a detectar un augment dels fitòlits de gramínia quan hi ha un augment de les diatomees; tal i com hem vist en el capítol 5 la correlació entre aquests dos elements implica canvis en els processos de formació dels fogars. En el treball d'Albert *et al.* (2000) és un dels primers on es va correlacionar l'alteració dels fitòlits amb la presència de calcita derivada de les cendres en els sediments i on es va veure per primer cop que hi ha diferències dintre d'un mateix fogar, amb tot, la comparació de mostres d'un mateix fogar es va limitar a un sol cas. A Hayonim l'anàlisi de fitòlits i del FTIR també s'utilitza per estudiar els fogars arqueològics (Albert *et al.*, 2003), aquí es confirma de nou l'efecte de la calcita de les cendres sobre la preservació dels fitòlits, les diferències microestratigràfiques en el contingut dels fitòlits dels fogars i la fusta com el principal combustible emprat en les estructures de combustió.

Dintre del context geogràfic del Pròxim Orient, Madella *et al.* (2002) van estudiar els sediments d'Amud; aquí es va tornar a correlacionar la presència de calcita provinent de les cendres amb fitòlits propis de les parts llenyoses de les dicotiledònies, però també es van detectar fitòlits propis de la inflorescència de gramínies que podrien implicar una recol·lecció d'aquestes plantes pels habitants mosterians de la cova.

A la Grotte XVI (Karkanas *et al.*, 2002) les anàlisis de fitòlits i de la mineralogia dels sediments van demostrar que la cendra és un dels principals components del nivell C, encara que també s'hi van detectar fitòlits de monocotiledònia que superen el rang establert per Albert i Weiner (2001) com a producte de la contaminació de la fusta. Tot i això Karkanas *et al.* (2002) van considerar que en termes de volum l'aportació de monocotiledònies al combustible emprat en els fogars no era significant i creuen que aquestes plantes podrien tenir uns altres usos; en canvi, com s'ha pogut comprovar a l'Abriç Romaní (Capítol 5), i com s'explica seguidament, tot i que sembla evident que el principal combustible utilitzat és la fusta s'ha de tenir en compte que les gramínies eren importants en fogars que tenen unes característiques diferenciades quant a situació, dimensió o preparació. Les diferències en la interpretació dels resultats podrien ser degudes a la diferent metodologia de mostreig, que en l'Abriç Romaní es produeix tant en perfil com en extensió, mentre que a la Grotte XVI només es produeix sobre el perfil i per tant no permetria diferenciar amb suficient claredat si el fogar mostrejat té unes característiques diferents a la resta del conjunt d'estructures de combustió. En la investigació duta a terme en la Grotte XVI ja s'apunta a que els fitòlits podrien servir per a comprovar diferències subtils en els processos de formació dels nivells cremats quan a través de la mineralogia no es poden diferenciar (Karkanas *et al.*, 2002). La utilitat dels fitòlits per a fer aquestes diferenciacions ha estat confirmada tant en el treball de l'Abriç Romaní, com en el treball de El Mirador, confirmant la hipòtesi plantejada per Karkanas *et al.* (2002).

A l'Abriç Romaní l'estudi dels fitòlits i les anàlisis de FTIR ens han permès entendre com funcionen els fogars del nivell J, la seva formació i els processos tafonòmics que van sofrir. Al contrari que en les coves del Pròxim Orient, els processos sedimentaris dominants a l'Abriç Romaní tenen un caràcter natural; en conseqüència, l'evidència més clara de processos de formació antròpics, si exclouem les restes arqueològiques recuperades, és la presència dels fogars, sobretot a nivell sedimentari ja que suposen una aportació (cendres) i una alteració (impacte tèrmic) dels sediments per part dels humans. També a diferència del jaciment de Tabun, els fogars de l'Abriç Romaní es poden identificar amb facilitat durant l'excavació, això es deu en part a que no han sofert processos diagenètics severos i al tipus de sediment que conforma el reompliment de l'Abriç.

Al tractar-se d'una excavació en extensió, són les característiques pròpies de l'excavació i del jaciment les que ens han permès fer inferències de caire espacial. Els fogars van estructurar les activitats que es van realitzar a l'abriç i per tant van influenciar directament la distribució de les restes arqueològiques (Vaquero i Pastó, 2001). Així doncs, entendre el funcionament de les estructures de combustió i la gestió que en van realitzar els ocupants de l'abriç ens ha permès comprendre millor l'organització espacial de les societats paleolítiques del moment, i en conseqüència, definir el grau de complexitat d'aquestes societats.

Fins el moment la majoria de les investigacions sobre els fogars del nivell J s'havien limitat a la classificació tipològica durant el treball de camp (Carbonell *et al.*, 1996; Pastó *et al.*, 2000). En els darrers anys la micromorfologia (Arteaga *et al.*, 2001; Vallverdú, 2002) i l'antracologia (Allué, 2002) han aportat noves dades sobre el funcionament dels fogars a l'Abriç. El treball presentat en aquesta tesi suposa una nova aportació en aquest sentit. A través dels estudis morfològics i quantitius dels fitòlits s'han determinat quatre tipus de fogars, o més ben dit, quatre processos de formació diferents dels fogars amb els quals compremem millor el funcionament d'aquestes estructures de combustió. Aquests processos de formació expliquen la deposició de les cendres, la seva alteració i la forma en que els humans les van gestionar i desplaçar. La determinació

dels processos que formen i alteren els sediments de les llars de foc s'ha recolzat amb l'estudi de la pèrdua de masses durant el tractament d'extracció dels fitòlits, la composició mineral dels sediments amb el FTIR i la quantificació de les diatomees que apareixen en les extraccions de fitòlits.

Els fitòlits a l'Abric Romaní ens expliquen la formació dels fogars, però evidentment també ens aporten informació sobre el combustible emprat; d'aquesta manera s'ha confirmat que el combustible principal era la fusta. Tot i això, a través de la utilització de diversos punts d'observació (descripció macroscòpica, fitòlits i diatomees) s'han identificat les gramínies com a principal combustible d'alguns dels fogars. La importància d'això rau en que en el mateix treball es va detectar com en les darreres fases de l'ocupació, i afectant a les parts superiors d'alguns dels fogars, el desenvolupament d'un incipient sòl el qual també va ser detectat per les anàlisis de la micromorfologia dels sòls (Vallverdú, 2002). Aquest sòl a nivell de microrestes vegetals ha estat caracteritzat per la presència de gramínies i de diatomees. Per tant, depenent de les condicions, la presència de gramínies podia ser interpretada erròniament com una aportació natural i no com un *input* antròpic en forma de combustible. Poder diferenciar les gramínies d'origen natural d'aquelles que tenen un origen antròpic ens ha permès reinterpretar alguns dels fogars més singulars del nivell J, i, a més a més, ens ha donat una base important per diferenciar processos de formació naturals, com ara el desenvolupament d'un sòl, de processos de formació antròpics. En aquest sentit cal remarcar que els fitòlits permeten la determinació de processos bioestratigràfics produïts pels humans i relacionats de forma indirecta amb els fogars; en el nostre cas el desplaçament de les cendres pel "trampling".

A l'Abric Romaní, de la mateixa forma que hem vist en els treballs dut a terme a la Gorja d'Olduvai, la formació del sòl implica un augment dels fitòlits alterats. També com en el cas dels sòls i paleosòls estudiats a Olduvai, o com en el cas de les coves israelianes (Albert *et al.*, 1999; Albert *et al.*, 2000; Albert i Weiner, 2001), la presència de calcita implica una major dissolució dels fitòlits. En l'Abric Romaní la calcita no té un origen postdeposicional, sinó que és el component mineral bàsic del travertí que forma el reompliment de l'abric. Tant si és postdeposicional com si és part del sediment original la presència de calcita sol indicar un pH bàsic. A més, s'ha de tenir en compte que en aquests fogars pot haver-hi cendres de fusta, la composició de les quals és bàsicament calcita (Etiégni i Campbell, 1991) i que poden fer que el pH sigui encara més elevat. La majoria dels fitòlits recuperats en el jaciment de l'Abric Romaní mostren signes d'alteració, però creiem que el seu conjunt continua essent significatiu per poder interpretar els processos de formació.

Tant el treball realitzat a l'Abric Romaní, com veurem seguidament en la investigació duta a terme a El Mirador, s'aporten dades empíriques que ens permeten entendre els processos de formació, però també aporten innovacions metodològiques dintre d'aquest camp, assolint d'aquesta forma un dels objectius que ens havíem marcat. En aquest sentit s'ha demostrat que es pot augmentar considerablement la quantitat d'informació obtinguda a través de les anàlisis dels fitòlits amb molt poca inversió de temps i diners. El càlcul de la pèrdua de masses o el comptatge de diatomees s'ha realitzat durant el procés d'extracció i d'observació en el microscopi dels fitòlits, i per tant, es pot dur a terme en qualsevol laboratori d'arqueobotànica preparat per a aquest menester. El diferent volum de carbonats, matèria orgànica i Fracció Insoluble en Àcid ens indica quines són les característiques dels sediments i dels fogars que hem estudiat. Com hem vist, la combinació d'aquests resultats amb el nombre de fitòlits és un punt clau per entendre els processos de formació a través de les constants detectades en el nivell J (Capítol 5).

El recompte de diatomees i el càlcul del seu percentatge respecte a la resta dels fitòlits ha mostrat com es pot detectar l'aparició d'un paleosòl, però també com s'han d'interpretar variacions en el tipus i nombre dels fitòlits en aquells fogars que tenen unes característiques especials. Això fa que es puguin detectar processos tafonòmics de caire natural, però també variacions en el combustible i funcionament dels fogars, la utilització de l'espai de l'abric i en la conducta dels seus habitants. L'aplicació del FTIR i de les anàlisis del pH no representen una despesa de temps i diners extraordinària i els resultats obtinguts aporten la informació necessària per avaluar tant la preservació de les cendres i els sediments, com la capacitat d'aquests sediments per produir alteracions postdeposicionals sobre els fitòlits. Tot i que aquests recursos no són estrictament necessaris en un laboratori de paleobotànica, sobretot pel que fa al FTIR ja que els pHímetres són més comuns, no és difícil trobar-los dintre de l'àmbit acadèmic o científic, i per tant la seva utilització no hauria de suposar un problema per a aquells investigadors interessats en desenvolupar l'estudi dels processos de formació a través dels fitòlits. S'ha de remarcar però, que per a una millor comprensió dels fenòmens que formen el registre arqueològic és necessari combinar els resultats obtinguts des dels punts de vista esmentats (fitòlits, FTIR, pèrdua de masses, etc.) amb els resultats obtinguts a partir d'altres disciplines com ara la tafonomia dels vertebrats, l'antracologia o la micromorfologia dels sòls aplicada a l'arqueologia. Només utilitzant un punt de vista pluridisciplinar es pot arribar a entendre completament la riquesa del registre arqueològic, però a més a més, a partir del treball realitzat a l'abric s'ha demostrat que aquesta pluridisciplinarietat també es dona dintre del camp dels fitòlits, ja que és necessari que l'investigador en fitòlits tingui coneixements de mineralogia, química o geologia per entendre completament el seu registre.

### 8.1.3. El Mirador

Al jaciment de El Mirador els resultats obtinguts ens han permès fer una interpretació directa dels processos de formació a partir de les restes arqueobotàniques. Les disciplines utilitzades (fitòlits i FTIR) han donat dades d'alta resolució que faciliten la interpretació de la variabilitat sedimentària del nivell estudiat. Aquestes dades han estat les que ens permeten millorar els aspectes metodològics; a partir de les investigacions realitzades al Mirador s'ha plantejat una nova forma d'estudiar la tafonomia dels sediments a través del tipus de fitòlits i del nombre d'esferòlits. En aquesta ocasió s'ha constatat de nou, com en el cas de l'abric Romaní, la importància d'estudiar altres microrestes que es poden observar en combinació amb l'estudi dels fitòlits. S'ha de remarcar que la diferenciació entre els fitòlits dipositats de forma natural i els fitòlits dipositats per alguna activitat antròpica ha permès establir l'origen de les fàcies estudiades. A més, durant la investigació duta a terme a El Mirador s'ha comprovat com l'observació de la pèrdua de masses durant l'extracció dels fitòlits és una eina útil també en els jaciments més antropitzats. S'ha de remarcar també que, al jaciment de El Mirador, tot i que està molt més antropitzat que els jaciments d'Olduvai o de l'abric Romaní, la combinació entre FTIR i fitòlits dona bons resultats per entendre els processos de formació.



Si bé és cert que les coves amb característiques similars a El Mirador són abundants en l'àrea Mediterrània, són poques les investigacions que combinen FTIR (o investigacions sobre la mineralogia dels sediments) i fitòlits de les que tenim notícia fins al moment. En aquest sentit el treball que es presenta en aquesta tesi respon a una necessitat de conèixer com s'han format els sediments acumulats al nivell 4 a partir de les restes arqueobotàniques, i més concretament a través de la determinació dels fitòlits i els minerals amb el FTIR. Tot i que aquest tipus d'estudi és una novetat per a nivells d'establució de l'Edat del Bronze, i sobretot per als jaciments de la Sierra de Atapuerca, estudis previs en d'altres indrets indicaven ja que aquest podia ser un camí a seguir.

Així doncs, un dels estudis més complets, i en certa forma pioner, és el de Brochier *et al.* (1992) en coves i abrics de Sicília. En aquest treball es va fer una aproximació etnoarqueològica a la formació de "fumiers" com els del reompliment holocè de la cova de El Mirador, i després va comparar els seus resultats amb els resultats obtinguts en una sèrie de jaciments arqueològics sicilians. Brochier (1992) va definir l'associació entre esferòlits i fitòlits com una de les característiques més significants dels sediments originats per la combustió dels excrements d'ovicaprins. El mateix autor va fer una aproximació als processos de formació relacionats amb les activitats ramaderes a la cova pirinenca de la Bélesta (Brochier *et al.*, 1998).

D'altra banda s'ha de tenir en compte que moltes de les investigacions que s'han dut a terme en els dipòsits similars als de El Mirador s'han basat en les anàlisis de la micromorfologia dels sòls (Boschian, 1997; Macphail *et al.*, 1997; Boschian i Montagnari-Kokelj, 2000; Karkanas, 2006). També s'han desenvolupat recerques experimentals per tal de comprendre millor com es formen aquestes acumulacions de fems cremats (Macphail *et al.*, 2004) però en poques ocasions s'ha utilitzat el FTIR o els fitòlits per estudiar aquests fems. En canvi, en les investigacions efectuades en els campaments Massai (Shahack-Gross *et al.*, 2003; Shahack-Gross *et al.*, 2004b) s'aplica tant l'anàlisi dels fitòlits, com el FTIR i la micromorfologia per estudiar les traces que deixen el ramat en els sediments. Tot i les diferències entre aquests treballs i la recerca desenvolupada en El Mirador, alguns dels resultats obtinguts en els campaments Massai han ajudat a interpretar les fàcies que formen els nivells del jaciment burgalès (Capítol 6).

El principal objectiu que ens vam marcar en aquesta tesi era demostrar que els fitòlits, amb l'ajuda del FTIR, poden proporcionar informació directa sobre els processos de formació. En el cas del treball portat a terme a El Mirador, s'ha demostrat aquesta premissa, és a dir, es poden utilitzar les restes arqueobotàniques, i més concretament els fitòlits, per estudiar directament els processos de formació, sempre i quan aquests resultats estiguin recolzats per les anàlisis del FTIR.

Aquest objectiu s'ha assolit degut a que les dades obtingudes per l'anàlisi de fitòlits i pel FTIR són d'alta resolució, en altres paraules, permeten detectar processos que deixen poca marca en el registre arqueològic, com ara la utilització de monocotiledònies en alguns fogars de l'Abric Romani, o en el cas de El Mirador el processament dels cereals en un nivell format bàsicament per les restes de l'establució del ramat. A El Mirador, les anàlisis de fitòlits i de la composició mineralògica a partir del FTIR han confirmat sense cap mena de dubtes que els fems són l'origen de la majoria de sediments al nivell 4 de la cova de El Mirador i, tanmateix, corroboren l'opinió dels arqueòlegs que varen estudiar el jaciment, que aquest espai va ser utilitzat com a lloc d'establució durant l'Edat del Bronze. Ara bé, amb les dades que han aportat totes les disciplines involucrades en la investigació s'ha demostrat que es pot definir molt més

acuradament la gènesi i transformació dels sediments estudiats. De fet, un dels punts que més interessava era explicar la causa de l'alta variabilitat del tipus de sediments que formen la seqüència holocena del jaciment. Si bé aquesta diversitat en la textura i la coloració dels sediments es deu en gran part a les variacions durant el procés de combustió, s'ha demostrat que el diferent origen dels sediments i la seva posterior alteració estan molt relacionats amb l'aspecte que presenten aquests sediments en l'actualitat. Així doncs, s'ha de reconèixer que el veritable avanç de l'aplicació dels fitòlits, del FTIR i d'altres disciplines arqueobotàniques en aquest jaciment no ha estat el fet de confirmar el que ja s'havia estimat a ull nu, sinó que s'han pogut inferir altres activitats, diferents a l'establiment del ramat, que en un principi van passar desapercebudes durant el procés d'excavació. Ens estem referint a activitats relacionades amb els cereals cultivats com l'esventat o el triat d'aquestes plantes; activitats que d'altra banda deixen molt poc, o gens de rastre, en el registre arqueològic (Harvey i Fuller, 2005; Karkanis, 2006). S'ha de remarcar que és l'anàlisi quantitativa i morfològica dels fitòlits el que en aquest cas ha donat la clau per entendre el processament de cereals dintre la cova.

A l'igual que en la investigació de l'Abric Romaní els aspectes metodològics són una aportació essencial del treball desenvolupat a El Mirador. A través de la combinació de l'anàlisi de les estructures multicel·lulars amb el recompte dels esferòlits s'han identificat processos postdeposicionals que afecten a la preservació dels sediments i dels fitòlits però que tenen un caràcter més aviat mecànic, i per tant diferenciat de la diagènesi química que sol acompanyar aquests sediments. S'ha de tenir en compte que en els sediments estudiats no s'han trobat evidències significatives de diagènesi causada per l'acció dels fosfats, tot i que aquests estan presents en els sediments, i per tant, s'ha de buscar l'origen d'aquestes alteracions en un altre agent. En els sediments millor preservats els esferòlits i les estructures multicel·lulars són abundants, mentre que en els sediments que han tingut alguna mena de moviment postdeposicional aquests dos elements disminueixen en nombre. En el treball sobre el Mirador (Capítol 6) s'ha plantejat la possibilitat que el moviment dels sediments desmembri les estructures multicel·lulars, convertint-les en fitòlits simples, i faci desaparèixer els esferòlits degut a la seva fragilitat. El moviment dels sediments estaria relacionat amb processos de bioturbació, que afectarien als sediments un cop dipositats, o bé amb el desplaçament dels sediments, previ enterrament, per part dels humans que ocupaven la cova. Efectes similars s'han detectat també al jaciment de Grotta dell'Uzzo (Brochier *et al.*, 1992). Els resultats de la combinació del comptatge d'esferòlits i d'estructures multicel·lulars són molt consistents i es presenten com una solució efectiva per determinar aquests processos en els jaciments on no es disposa d'altres anàlisis com la micromorfologia dels sòls aplicada a l'arqueologia.

Així doncs, dins de l'àmbit metodològic s'ha de considerar que, una altra de les aportacions que fa el treball de El Mirador, a l'igual que en el cas de l'Abric Romaní, és la utilització d'altres microrestes per tal d'aconseguir informació addicional per al nostre estudi. Si en el cas de l'Abric Romaní eren les diatomees, en el cas de El Mirador és el comptatge dels esferòlits fecals i dels oxalats de calci el que ens ha permès una interpretació més precisa dels sediments d'aquest jaciment. L'addició d'aquesta informació als resultats que obtenim de les analítiques de fitòlits té l'avantatge de no necessitar una despesa considerable de temps; en el cas dels esferòlits i els oxalats de calci no va ser necessària l'extracció d'aquests elements dels sediments per a la seva observació en el microscopi, mentre que en el cas de les diatomees aquestes es podien observar directament en les làmines que es van preparar per al comptatge de fitòlits.

A més a més, l'anàlisi del FTIR juntament amb l'estudi morfològic dels fitòlits i d'altres restes botàniques recuperades, ha permès distingir entre sediments que es van dipositar i es van transformar en el jaciment (no ens referim a sediments autigènics sinó als fems que es cremen en la cova) i sediments al·lòctons que van ser transportats a l'interior de la cova per a realitzar alguna activitat (com ara l'argila que forma les *fàcies i*). Aquesta diferenciació ha estat possible gràcies a l'estudi comparatiu realitzat amb les mostres de control que van ser extretes dels sòls actuals del voltant del jaciment. Així doncs, s'ha de remarcar la importància que té, en els estudis de fitòlits, el fet de conèixer els sòls actuals per poder fer una interpretació més acurada dels sediments arqueològics. Això queda especialment exemplificat en el cas de El Mirador i de la Gorja d'Olduvai.

També a nivell metodològic, s'ha d'emfatitzar que el registre del volum perdut durant el procés d'extracció dels fitòlits, ha aportat una valuosa informació ja que:

1. Ha contrastat de forma empírica les observacions *in situ*. Un exemple és el de la matèria orgànica: el volum d'aquesta és més difícil de determinar amb el FTIR, però seguint les dades obtingudes per la pèrdua de massa s'ha observat com les mostres que havien estat prèviament descrites amb més alt contingut orgànic (fems sense cremar, mostres carbonoses i mostres dels sòls actuals) han presentat un major contingut en matèria orgànica.

2. Ha servit per caracteritzar *fàcies* amb una composició mineralògica similar i per tant ha ajudat a fer interpretacions diferencials a l'igual que en l'Abri Romaní. En altres paraules: les distintes proporcions de carbonats, matèria orgànica i AIF han permès diferenciar *fàcies* que, únicament amb els resultats del FTIR eren difícilment distingibles. Això ha demostrat que la pèrdua de volum, durant el procés d'extracció de fitòlits, es pot extrapolar a altres jaciments, independentment dels processos de formació que hi intervenen. Naturalment, és necessari realitzar en paral·lel, la identificació dels minerals per descartar la presència de mineral autigènic, ja que la gènesi d'aquests comporta una pèrdua de volum sobre el mineral original (Weiner *et al.*, 1995; Schiegl *et al.*, 1996; Karkanis *et al.*, 2000; Weiner *et al.*, 2002).

És evident doncs, que en el Mirador, com en els altres jaciments que presentem en aquesta tesi, és molt important conèixer la mineralogia dels sediments a partir del FTIR. Aquests resultats han demostrat, que tot i que es pot detectar la presència de fosfats al nivell 4, aquests no han causat una diagènesi severa que pugui produir problemes estratigràfics. Aquestes inferències sobre la dissolució dels sediments ens han permès reinterpretar els conjunts de fitòlits recuperats, sobretot en termes de nombre de fitòlits per gram de sediment o de la presència d'altres elements com els esferòlits o els oxalats de calci que poden ser dissolts amb major facilitat (Canti, 1999; Shahack-Gross *et al.*, 2003). En aquesta mateixa tesi, i com veurem seguidament, s'han aportat dades que demostren com en jaciments amb una alta antropització com El Mirador, o com ara Tel Dor (capítol 7.1), el suport que han proporcionat els resultats del FTIR a la interpretació del conjunt de fitòlits ha resultat fonamental.

En definitiva les investigacions efectuades en el jaciment de El Mirador ens han permès caracteritzar les diferents *fàcies* que formen el nivell 4 a través de les restes arqueobotàniques i de la seva composició mineral. També s'ha pogut definir l'origen de l'alta variabilitat dels sediments que formen el nivell a través de l'obtenció de dades d'alta resolució que permeten entendre la gènesi i la diagènesi d'aquests sediments. Però a més a més s'han proposat unes

bases per a la metodologia que permeti utilitzar aquestes dades per entendre els processos de formació, bases que es veuen recolzades pels estudis realitzats a Olduvai, a l'Abric Romaní, i com veurem seguidament a Tel Dor.

#### 8.1.4. Tel Dor

L'estudi dels fitòlits a les diferents localitats de Tel Dor ha complementat els resultats obtinguts al jaciment de El Mirador i ens ha permès estudiar els processos de formació arqueològics en un jaciment altament antropitzat. El caràcter pluridisciplinar de la investigació realitzada (micromorfologia dels sòls aplicada a l'arqueologia, FTIR i fitòlits) ha relacionat els fitòlits amb el medi sedimentari que els envolta i també ha demostrat quina és la seva relació amb les estructures arquitectòniques que formen el jaciment. Així doncs, s'ha comprovat la validesa de les hipòtesis plantejades a partir de les investigacions en l'Abric Romaní i a El Mirador, així com també s'han comprovat les possibilitats de les anàlisis de fitòlits per estudiar els processos de formació en jaciments com el de Tel Dor. Curiosament, a l'igual que en el cas de El Mirador, molts dels processos de formació previs a l'enterrament que s'han identificat a Tel Dor a través dels fitòlits estan relacionats amb la gestió dels residus animals, en concret dels fems. Però s'ha de considerar també que la determinació de l'origen de les plantes (cultivades vs no cultivades) a partir de la utilització d'una col·lecció de referència moderna i l'anàlisi morfomètric ha donat peu a una caracterització més detallada dels processos de formació antròpics. La identificació dels processos postdeposicionals que afecten als fems a partir dels fitòlits i els esferòlits ha permès comprovar els aspectes metodològics que s'havien plantejat en el cas de El Mirador, però, d'altra banda, també ha permès reconsiderar les interpretacions arqueològiques i culturals dels estrats que s'han investigat.

La definició de la formació i l'origen de les capes riques en fitòlits a Tel Dor ha estat un dels objectius d'aquesta investigació. Com s'ha vist en el capítol 7, en la seva majoria, l'origen de les acumulacions riques en fitòlits està en la incineració dels fems acumulats dintre dels límits de la ciutat, en ocasions la seva redeposició en altres zones de la ciutat, i la seva posterior transformació diagenètica que fa que els sediments resultats estiguin compostats bàsicament per fitòlits. En canvi, en el jaciment de Tel Yin'am els nivells rics en fitòlits es van interpretar de forma diferent (Liebowitz i Folk, 1980). En aquest jaciment es va identificar un nivell ric en fitòlits similar als descrits a Tel Dor, tant pel que fa a la inclinació, gruix i descripció macroscòpica, així com una zona lenticular de les mateixes característiques que no ocupa tot l'espai de l'habitació excavada. Les dues acumulacions es van interpretar com el resultat d'un incendi accidental de palla provinent de cereals cultivats i utilitzada com a combustible en les instal·lacions industrials immediates. En una revisió d'aquest nivell de fitòlits (Folk i Hoops, 1982) es va determinar que els fitòlits van estar alterats tèrmicament fins a perdre la seva morfologia original i composició química. Tot i que es va arribar a plantejar la hipòtesi de la producció de vidre a partir de la fusió dels fitòlits, els investigadors continuen defensant la idea d'un incendi accidental d'una acumulació de palla.

Una de les principals aportacions de les investigacions de Tel Dor ha estat l'aproximació a l'espècie productora dels fitòlits, i sobretot la diferenciació entre fitòlits originats en plantes cultivades i fitòlits originats en plantes no cultivades. Al Pròxim Orient estudis previs ja havien dut a terme aquesta aproximació. Així doncs, cal destacar els treballs de Rosen, que en un altre marc cronològic però també en la mateixa regió, va estudiar els fitòlits dels primers jaciments neolítics de la zona i aconseguí identificar les plantes cultivades que els han produït (Rosen, 1989; Rosen, 1993; Rosen, 1997). Un altre treball similar al que s'ha desenvolupat en Tel Dor és el que es va efectuar a Tel Miqne (Ekron). En aquest jaciment Ollendorf (1987) va estudiar els fitòlits dipositats en els nivells del segle XII a.n.e. L'objectiu d'aquest estudi era identificar els sòls d'ocupació filisteus, identificar les plantes utilitzades, i diferenciar entre conjunts de fitòlits d'origen antròpic dels conjunts de fitòlits d'origen natural. Tot i que sembla ser que aquesta investigadora va aconseguir diferenciar els fitòlits d'origen natural dels fitòlits d'origen antròpic no va deixar clares quines són les característiques de les diferents acumulacions; a més, la identificació dels sòls d'ocupació i de les plantes utilitzades va quedar lleugerament esbiaixada per la falta d'estudis geoarqueològics.

En el cas de Tel Dor, els resultats de les anàlisis morfològiques dels fitòlits també ens han ajudat a determinar les característiques dels processos de formació culturals. A l'igual que en les investigacions a Olduvai, aquest tipus d'anàlisi ens ha permès fer una aproximació més precisa a l'espècie vegetal que ha produït els fitòlits. A Tel Dor ha estat important definir la procedència dels fitòlits, ja que la diferenciació entre fitòlits de plantes cultivades i fitòlits de plantes no cultivades ens ha permès identificar l'origen i funció d'aquestes plantes, i, indirectament, interpretar la formació de les diferents capes riques en fitòlits al jaciment. Depenent del tipus de planta que ha produït els fitòlits s'ha interpretat si els vegetals que han format les capes riques en fitòlits estaven destinats al consum humà o bé estaven destinats per a l'alimentació del bestiar. En aquest sentit s'hauria de recordar les discussions dels capítols 6 i 7. Al jaciment de El Mirador la presència de la inflorescència de cereals cultivats no s'ha interpretat com un indicatiu de l'alimentació del ramat establert en la cova a partir del gra d'aquests cereals, ja que és un procediment econòmicament car si tenim en compte les capacitats agràries de l'època (Halstead, 1996). En canvi, en jaciments amb característiques similars a les de El Mirador s'ha interpretat just el contrari (Karkanas, 2006). A Tel Dor la presència de fitòlits de la inflorescència de cereals cultivats s'ha determinat bàsicament en els nivells blancs, en els quals també s'ha identificat la presència de fems. Tenint en compte que Tel Dor és un centre urbà de certa importància, cap la possibilitat de que algun dels sobrants de la collita es destinessin a l'alimentació del ramat. No obstant, s'ha de pensar que en els nivells blancs poden existir dos processos de formació diferenciats, el processament dels cultius i l'establiment dels animals, i cap la possibilitat que no s'hagin pogut diferenciar temporalment ja que podrien haver tingut lloc en un espai de temps breu. Sigui com sigui, la solució a aquesta problemàtica passa per fer un estudi detallat de les alteracions que sofreixen els fitòlits al passar pel tracte digestiu dels ruminants, i veure, en el cas que es produeixin, si és viable la seva identificació en un context arqueològic.

La determinació de l'índex de refracció dels fitòlits permet saber si aquests han sofert un procés de combustió. L'obtenció d'aquestes dades a Tel Dor ha estat important ja que ens ha aportat informació sobre la gestió dels fems dels animals i la seva alteració després de la seva deposició. S'ha de tenir en compte que els fems cremats redueixen considerablement el seu volum i canvien la seva composició química. A més a més, les anàlisis de FTIR i de la micromorfologia dels sòls han permès determinar la posició secundària d'alguns dels nivells

analitzats, és el cas de certs nivells de cendres especialment en la zona D2, la qual cosa implica un procés de formació cultural que comporta el transport dels fems, un cop aquests han estat cremats, cap a altres zones del jaciment.

Pel que fa als processos de formació postdeposicionals detectats a Tel Dor aquests estan en relació directa amb la natura i l'origen de les acumulacions de les capes riques en fitòlits, és a dir els fems. La formació de capes de sediment amb una densitat tan alta de fitòlits no es produeix de forma natural, i així s'ha pogut observar en els treballs realitzats en la Gorja d'Olduvai. D'altra banda, sembla evident que els habitants de Dor no van acumular de forma intencionada els fitòlits sense la part orgànica de la planta, les cendres o els fems; en altres paraules, no van extreure els fitòlits de la seva matriu i els van dipositar en els sediments analitzats.

L'alta concentració de fitòlits, com hem vist, es produeix després que la matèria orgànica que acompanya als fems es degradi, i en conseqüència hi hagi una pèrdua considerable del volum del sediment. Aquesta pèrdua del volum fa que els sediments que formen els *Tels* es comprimeixin afectant directament a la posició estratigràfica de les restes recuperades (Shahack-Gross *et al.*, 2005). Evidentment, és molt important conèixer aquests factors de compressió del sediment per poder realitzar una bona interpretació cronostatigràfica i cultural.

La degradació de la matèria orgànica no afecta només a la posició estratigràfica de les restes sinó que també té efectes sobre la conservació d'elements com els esferòlits que ens ajuden a determinar l'origen i estat dels sediments. A Tel Dor la presència de matèria orgànica en degradació, acompanyada de l'existència d'aigua, temperatura adient i una activitat microbiòtica determinada, hauria permès l'acidificació dels sediments (Buol *et al.*, 2003). Un pH més àcid pot fer que els esferòlits es dissolguin i desapareguin, ja que aquests són relativament poc estables en ambients àcids (Canti, 1999; Shahack-Gross *et al.*, 2003). En canvi, com hem vist abans, al jaciment de El Mirador la presència de matèria orgànica no ha estat suficient per fer desaparèixer els esferòlits, però aquests elements disminueixen dràsticament quan hi ha una remobilització dels sediments. Aquestes diferències observades en ambdós jaciments està relacionada amb el fet que en El Mirador la matèria orgànica que acompanya el fem cremat no s'acaba de degradar del tot i, a més, s'ha de considerar que la presència de fem cremat estabilitza el pH en nivells suficientment bàsics per preservar els esferòlits, almenys fins que la cendra és lixiviada (Canti, 1999). D'altra banda, al jaciment de Tel Dor les capes que presenten menys esferòlits són les capes formades per fems cremats en posició secundària; així doncs, independentment de l'augment de l'acidesa del pH dels sediments, la remobilització d'aquests afecta de forma directa a la preservació dels esferòlits tal i com s'ha demostrat en els dos jaciments. Finalment, s'ha de considerar que les condicions ambientals pròpies de cada zona i el tipus de jaciment (cova a El Mirador i jaciment urbà a l'aire lliure a Tel Dor) fan que les condicions per a la preservació dels esferòlits siguin lleugerament diferents en els dos casos. Amb tot, creiem que ha quedat demostrat que el comptatge dels fitòlits i la seva comparació amb el comptatge dels esferòlits dóna uns resultats efectius a l'hora de determinar processos tafonòmics que afecten a la preservació dels sediments on s'ha dipositat fem.

A nivell metodològic, i continuant en aquest sentit, la presència de fems a Tel Dor es va determinar utilitzant la micromorfologia dels sòls, les característiques morfològiques dels fitòlits, la presència d'esferòlits i la determinació de fosfats autigènics a través del FTIR. Aquests resultats han confirmat els obtinguts al jaciment de El Mirador on, sense l'ajuda de la micromorfologia però tenint en compte els altres factors, s'ha determinat la presència de fems cremats dintre la cova.

Així doncs, creiem que, en el cas de no poder disposar dels resultats de la micromorfologia dels sòls, la presència d'esferòlits, la determinació mineral per FTIR i el tipus de fitòlits són suficients raons de pes per determinar de forma clara l'existència de fems cremats en el sediment.

La revisió dels processos de formació culturals a través dels fitòlits, el FTIR i la micromorfologia ha fet que es pugui determinar la utilització de l'espai urbà així com la gestió dels recursos vegetals i els excrements dels ruminants durant el període en que Dor estava governat pels Pobles del Mar. Els resultats obtinguts a partir de la col·laboració dels diferents investigadors ha demostrat que alguns dels nivells rics en fitòlits tenen la seva gènesi en la degradació del fem d'animals estabulats dintre la ciutat. Així mateix, el diferent contingut en fitòlits i les variacions en l'estructura micromorfològica del sediment han indicat que una mateixa àrea pot tenir funcions diferents en molt poc espai de temps. En aquest sentit, i tenint present que hi ha edificis que es van utilitzar en algun moment com a estables per al ramat, els arqueòlegs han apuntat a que s'han de revisar aspectes com la densitat de la població, la mida dels ramats, o, fins i tot, l'assumpció de l'ocupació sincrònica de la totalitat dels edificis durant la formació d'un estrat. Així doncs, entendre la formació d'aquestes capes riques en fitòlits ha permès reinterpretar el concepte de ciutat durant el Bronze i l'Edat del Ferro en el Pròxim Orient; fins al moment s'havia considerat la ciutat com un centre que importava els recursos primaris, però almenys en el cas de Dor els seus habitants disposaven dels seus propis ramats, i per tant, també eren productors de recursos primaris.

## 8.2. Discussió General

### 8.2.1. Diferenciació dels processos de formació antròpics i els processos de formació naturals a través dels fitòlits, els minerals i altres microrestes

Un dels objectius principals d'aquesta investigació era poder diferenciar entre processos de formació naturals i processos de formació antròpics a partir del contingut en fitòlits dels sediments. Per assolir aquest objectiu s'han tingut en compte els processos previs i posteriors a la deposició dels fitòlits en els sediments, tant si són d'origen natural com si són d'origen antròpic. Són els processos previs a l'enterrament i els processos tafonòmics posteriors els que defineixen el conjunt final de fitòlits. D'aquí la importància de determinar el tipus de fitòlit, la seva quantitat, l'existència d'altres elements microscòpics i la composició mineral dels sediments que els envolta, ja que aquests quatre elements són els que ens han donat la informació necessària per diferenciar les acumulacions de fitòlits antròpiques de les acumulacions de fitòlits naturals.

El problema de diferenciar entre l'origen antròpic i natural dels fitòlits ha quedat resolt tant i en quant cada un d'aquest tipus de formació té unes característiques pròpies (Taula 1), les quals s'arriben a distingir fins i tot en el cas de processos diagenètics severos que afecten a la preservació dels fitòlits. La distinció entre origen antròpic o natural de les acumulacions de fitòlits en el sediment arqueològic és fonamental per a una correcta interpretació dels processos de formació d'un jaciment, especialment en aquells casos on els processos naturals poden emascarar els processos antròpics, com per exemple el cas de la utilització de gramínies com a combustible en l'Abric Romani.

En aquest sentit, el tipus de fitòlit i la quantitat que hi trobarem en un sediment arqueològic depèn en gran part dels processos de formació previs a l'enterrament dels fitòlits. Tant si és d'origen natural com d'origen antròpic un conjunt de fitòlits està molt marcat pel tipus de planta que els produeix i, sobretot, per la forma en que les restes de les plantes mortes s'acumulen i es destrueixen per alliberar els fitòlits. Aquest fet fa que en el cas de les mostres procedents d'acumulacions d'origen natural es pugui identificar la formació vegetal del passat, i en el cas de les mostres procedents d'ambients antròpics es puguin fer inferències sobre el comportament dels nostres avantpassats.

Els processos tafonòmics que determinen la preservació dels fitòlits són diferents si les acumulacions de fitòlits tenen un origen natural o bé si tenen un origen antròpic. En els treballs presentats s'ha demostrat que els processos tafonòmics que afecten a la preservació dels fitòlits, en el cas d'una acumulació natural, són pràcticament immediats, mentre que si formen part d'una acumulació antròpica el temps d'acció d'aquests processos dependrà més del tipus de jaciment i de la matriu sedimentària que forma els diferents nivells. Com hem vist en el capítol 3 durant la formació d'un sòl les plantes que hi viuen poden arribar a reciclar els mateixos fitòlits que han produït (Meunier *et al.*, 2001; Conley, 2002; Farmer, 2005; Farmer *et al.*, 2005).



	Origen natural	Origen antròpic
<b>Tipus de fitòlit</b>	Conjunt homogeni representant totes les parts de la planta i el conjunt de plantes presents (s'han de tenir en compte els biaixos postdeposicionals i de pressió ecològica)	Fitòlits d'un tipus de planta o d'una part de la planta identificats en nombre molt superior al de la mitjana de la resta de plantes o part de la planta
<b>Nombre de fitòlits</b>	Continuo al llarg de la seqüència o de l'espai analitzat	Variacions importants de mostra en mostra
<b>Percentatge d'alterats</b>	Homogeni. Els fitòlits més resistents també poden presentar signes d'alteració	No homogeni, mostres amb més percentatges d'alterats que unes altres
<b>Presència diatomees</b>	Presentes si hi ha humitat important durant la formació d'un sòl	Absents (si estan presents poden ser postdeposicionals)
<b>Presència esferòlits</b>	Absents	Presentes si els fitòlits provenen de l'acumulació dels fems
<b>Mineralogia</b>	A grans trets, homogènia dintre del mateix paleosòl	Variacions en la composició mineral bàsica importants
<b>Pèrdua de masses per tractament</b>	Resultats similars en totes les mostres	Resultats variables de mostra a mostra

Taula 1. Descripció de les principals característiques d'una acumulació de fitòlits d'origen natural (sòl) o d'origen antròpic.

Els resultats obtinguts en els sòls moderns de la zona d'Olduvai confirmen la ràpida actuació d'aquests processos tafonòmics en un ambient no antropitzat. En canvi, en els jaciments que s'han estudiat en aquesta tesi, els processos d'acumulació de fitòlits que en resulten d'una activitat antròpica se solen donar en llocs on no hi ha una cobertura vegetal important (una cova, un abríc o una vil·la) i on els processos edàfics són pràcticament inexistents mentre es registren les activitats antròpiques. Amb tot, es pot donar la circumstància que aquests processos hi apareguin al final de l'ocupació, l'exemple més clar en aquest sentit és la formació d'un sòl al final del nivell J a l'Abriç Romaní, però fins i tot aquí es pot diferenciar l'origen antròpic i l'origen natural dels fitòlits.

Si bé és cert que l'espectre de fitòlits dependrà molt de la planta que els ha produït i de la forma com s'ha produït aquesta acumulació, s'han de tenir en compte tots aquests processos tafonòmics ja que són els que defineixen la configuració final del conjunt de fitòlits que es poden recuperar en el sediment, és a dir, en certa forma actuen de filtre per a les diferents morfologies que es conservaran.

Determinar amb la major exactitud possible quina és la planta productora dels fitòlits analitzats és un dels punts claus per entendre els processos de formació, sobretot els culturals, que entren en joc abans de la deposició dels fitòlits. A El Mirador i a Tel Dor la identificació de plantes cultivades ens ha permès entendre com es van formar aquests jaciments. Els fitòlits han estat utilitzats sovint per explicar quines eren les plantes cultivades durant el passat (Piperno i Pearsall, 1993b; Rosen, 1993; Rosen, 1997; Berlin *et al.*, 2003; Boyd *et al.*, 2006; Saxena *et al.*,

2006; Li *et al.*, 2007; Pohl *et al.*, 2007), com es van cultivar (Rosen i Weiner, 1994) i com es van utilitzar (Portillo, 2006; Tsartsidou *et al.*, 2008). En el cas de El Mirador, s'ha de tenir en compte que fins al moment s'havia considerat que a les coves on s'establava el ramat les activitats relacionades amb la producció agrícola eren limitades o pràcticament inexistents (Brochier *et al.*, 1992; Badal, 1999; Boschian i Montagnari-Kokelj, 2000; Vergès *et al.*, 2002; Alday *et al.*, 2003; Karkanis, 2006). Amb els resultats obtinguts a El Mirador s'ha vist com aquests pastors també duïen a terme tasques relacionades amb l'agricultura, i que aquestes tasques produeixen un tipus de sediment específic que es pot identificar amb claredat a partir del conjunt de fitòlits (Harvey i Fuller, 2005). A Tel Dor, la diferenciació entre fitòlits de plantes cultivades i fitòlits de plantes no cultivades ens permet definir millor l'origen d'alguna de les capes riques en fitòlits, i això ha comportat la reinterpretació dels processos culturals que generen sediments en les ciutats. En altres centres urbans del Pròxim Orient l'estudi dels fitòlits també ha permès identificar fases d'ocupació i fases d'abandonament de les ciutats (Ishida *et al.*, 2003) o bé determinar quina funció tenen les estructures arquitectòniques (Madella, 2001).

Les variacions en el nombre de fitòlits entre les mostres dels jaciments estudiats ens ha permès diferenciar formacions sedimentàries similars però amb una gènesi i diagènesi diferents. Això és especialment evident en les fàcies de El Mirador, entre les capes que formen els fogars de l'Abric Romani, i entre les diferents zones estudiades a Tel Dor, però també ho és en condicions de formació no antròpiques, com en les localitats investigades a Olduvai. Els biaixos produïts pels processos postdeposicionals poden dificultar el càlcul de la quantitat exacta de plantes que han proporcionat un determinat nombre de fitòlits en el sediment, a la qual cosa s'ha d'afegir el fet que, si el procés de deposició té un caràcter antròpic, és possible que no s'hagi utilitzat la totalitat de la planta. No obstant, és molt important calcular la quantitat de fitòlits per gram de sediment o de fracció insoluble en àcid, i no tan sols realitzar la identificació i distribució percentual de les diferents morfologies (Albert i Weiner, 2001). Només combinant la identificació amb el comptatge serà possible realitzar inferències sobre els processos de formació, ja que d'aquesta manera es pot calcular, almenys de forma relativa, les diferències en el *input* vegetal durant la deposició d'un sediment determinat i comparar aquesta informació dintre del mateix jaciment o entre jaciments diferents. En aquest sentit, s'hauria de remarcar que, sense l'estimació de la quantitat de fitòlits presents en el sediment, fins i tot la interpretació paleoecològica, s'entén que basada només amb els diferents percentatges de morfologies, pot arribar a ser dubtosa ja que com hem vist hi ha diferències de preservació i producció considerables entre les diferents espècies vegetals.

Per a una millor interpretació del conjunt de fitòlits és important identificar i quantificar altres elements microscòpics com ara oxalats de calci, esferòlits o diatomees. La integració de les dades que obtenim de l'estudi d'aquestes restes amb les dades obtingudes dels fitòlits ens ha donat una visió més estructurada del contingut dels sediments i ens ha informat sobre el seu origen. En els jaciments de El Mirador i Tel Dor la presència d'esferòlits ens ha ajudat a identificar els fems com l'origen principal dels fitòlits d'algunes fàcies o capes, mentre que a l'Abric Romani la presència de diatomees en els sediments ha estat relacionada amb els estadis inicials del desenvolupament d'un sòl. La informació que s'extreu d'aquests elements (diatomees, esferòlits, etc) s'ha obtingut d'una forma senzilla, pràcticament al mateix temps que s'ha realitzat l'estudi quantitatiu i morfològic dels fitòlits. En el cas de les diatomees, com que tenen una composició mineral pràcticament idèntica a la dels fitòlits, ha estat fàcil identificar-les durant el comptatge

d'aquests últims, mentre que per als oxalats de calci i els esferòlits s'han pogut observar amb llum polaritzada muntant sobre la làmina el mateix sediment que s'ha utilitzat per a l'anàlisi dels fitòlits, evidentment abans de ser tractat amb àcids per a l'extracció d'aquests últims.

La determinació de la composició mineral bàsica a través del FTIR resulta essencial per poder interpretar alguns dels processos tafonòmics més comuns que afecten a la preservació dels fitòlits. Aquests processos segueixen les lleis de la química i de la física i per tant es poden detectar i els seus efectes es poden prevenir, tal i com s'ha demostrat en les investigacions realitzades en aquests quatre jaciments. S'ha de destacar que un dels processos postdeposicionals que més afecten a la preservació dels fitòlits és l'augment del pH, és a dir, la tendència a que el pH sigui més bàsic, els quals es donen sobretot en contextos calcítics amb presència d'aigua (Piperno, 1985; Piperno, 1988; Albert *et al.*, 1996; Albert *et al.*, 2000; Piperno, 2006). La presència de calcita en els quatre casos estudiats implica la dissolució de part del conjunt de fitòlits, encara que això és més evident en els jaciments de cronologies més antigues, on possiblement el factor temps també juga un paper important. L'augment del pH es pot determinar fent el càlcul del pH sobre el sediment analitzat, però també es pot realitzar de forma indirecta a través de l'observació dels minerals que acompanyen als fitòlits en el sediment. En aquest sentit resulta de gran ajuda la identificació dels minerals a través del FTIR, ja que, a més de detectar la presència de calcita, ofereix informació sobre altres processos postdeposicionals que poden haver alterat els sediments sense afectar els fitòlits. Aquests processos poden comportar la diagènesi de la calcita que forma les cendres i "comprimir" els sediments reconcentrant les cendres i fent augmentar, d'aquesta forma, el nombre de fitòlits per gram de sediment (Schiegl *et al.*, 1996; Albert *et al.*, 2003). També, tal com s'ha observat a Tel Dor i a El Mirador la presència de certs elements minerals com els fosfats, ens poden ajudar a determinar l'origen de les acumulacions de fitòlits (Shahack-Gross *et al.*, 2003).

Finalment s'ha de destacar que en els quatre casos que es presenten en aquest treball la comparació entre els conjunts de fitòlits identificats amb altres elements microscòpics, o amb la informació obtinguda del registre arqueològic per d'altres disciplines, ens permet una comprensió més àmplia dels elements que configuren els processos de formació d'un jaciment. En altres paraules; la pluridisciplinarietat i la multiplicació dels punts de vista és absolutament necessària en una ciència com l'arqueologia on cadascun dels diferents especialistes aporta una peça del trencaclosques per resoldre les diferents problemàtiques.

## 8.2.2. Avantatges i limitacions de les anàlisis dels fitòlits per estudiar els processos de formació

Arribats a aquest punt és necessari recapitular i veure quins són els límits i quines són les possibilitats de les anàlisis de fitòlits per interpretar els processos de formació dels jaciments arqueològics, ja que aquest també és un dels objectius generals que ens havíem plantejat inicialment.

Un dels principals avantatges que tenen els fitòlits està directament relacionat amb la seva composició química (capítol 3), la qual els converteix en un dels elements més resistents que es poden trobar en els sediments. Degut a aquesta resistència, i si les condicions de preservació no són excessivament adverses, podem estudiar els processos de formació a partir dels fitòlits independentment del període temporal que investiguem. En el capítol 3 s'ha fet un repàs al rang cronològic que abracen les investigacions sobre fitòlits. Aquest rang cronològic tan ampli està directament relacionat amb un altre avantatge que ofereixen les anàlisis de fitòlits; com s'ha demostrat en el present treball, els processos de formació dels jaciments arqueològics es poden estudiar independentment del grau d'antropització del jaciment, el qual acostuma a augmentar a mesura que ens aproximem a cronologies més recents. També s'ha de tenir en compte que en el present treball s'han testat diferents tipus de jaciments (a l'aire lliure, en abric, en cova i urbà) i per tant podem afirmar que les anàlisis de fitòlits permeten comprendre millor els processos de formació amb independència del tipus de jaciment analitzat. Aquesta data, però, s'ha d'agafar amb precaució ja que caldria analitzar més tipus de jaciments per veure si en efecte es compleix aquesta premissa.

L'adequació dels fitòlits per l'estudi de la formació dels jaciments ha estat demostrada al poder definir amb alta resolució processos de formació antròpics a partir de l'anàlisi d'aquests elements. Ens referim a processos de tipus cultural com ara la selecció del combustible, la gestió dels fems del ramat, les diferències en la utilització dels espais, etc. Aquestes inferències es poden fer a partir de les variacions en les morfologies de fitòlits presents a les mostres, però també a partir de la quantificació d'aquests; la quantificació dels fitòlits ens permet diferenciar l'origen de sediments que poden tenir el mateix espectre fitolitològic i a la vegada dilucidar les diferències en la intensitat de l'ocupació.

178

L'estudi dels fitòlits també ens ha ajudat a deduir processos de formació naturals, sobretot aquells relacionats amb la formació dels sòls (capítols 4 i 5). Com hem vist en la taula 1 la formació dels sòls té unes característiques diferents a les acumulacions de fitòlits d'origen antròpic i això és el que ens ha permès detectar aquests processos naturals en els sediments arqueològics. D'entre el conjunt de processos de formació naturals que s'han identificat a través dels fitòlits destaquen els processos postdeposicionals. Aquests processos afecten tant a la preservació dels fitòlits com a la conservació de la resta del registre arqueològic. Els possibles efectes de la bioturbació sobre els fitòlits i esferòlits a El Mirador i la pèrdua del volum sedimentari a Tel Dor són exemples de processos postdeposicionals que afecten als sediments arqueològics; però també sediments com els dels sòls i paleosòls d'Olduvai sofreixen processos postdeposicionals que s'han detectat a través de les anàlisis de fitòlits i de la composició mineral dels sediments.

Una de les principals limitacions dels fitòlits en el camp de la investigació dels processos de formació és que no sempre trobem fitòlits als jaciments que estudiem, tant perquè no van estar presents com perquè s'han dissolt degut a les condicions sedimentàries. En aquest sentit cal remarcar que tot i que cada cop s'estudia més la tafonomia dels fitòlits, el present treball n'és un exemple entre molts d'altres, encara hi ha tota una sèrie de processos tafonòmics que són difícils d'identificar i d'interpretar. La manca d'estudis experimentals, tant *in vitro* com al camp, (Piperno, 2006. pp22) fa que sigui necessari realitzar tot un seguit d'experimentacions per determinar amb més exactitud els agents que, per exemple, determinen la millor preservació d'uns fitòlits sobre uns altres, o les senyals químiques que deixen els processos diagenètics en els fitòlits.

Cal remarcar també la dificultat d'identificar processos postdeposicionals de caire cultural; en els jaciments més antropitzats que s'han estudiat, El Mirador i Tel Dor, s'han detectat bé durant el procés d'excavació o bé per altres analítiques processos postdeposicionals de signe antròpic; aquests van des de l'alteració tèrmica dels sediments un cop enterrats (Tel Dor) fins a excavació de fosses que retallen els nivells dipositats prèviament (El Mirador i Tel Dor) (Vergès *et al.*, 2002; Shahack-Gross *et al.*, 2005; Berna *et al.*, 2007). S'ha de tenir en compte, però, que en casos com el del Mirador, on es detecta un enterrament secundari de restes humanes (Vergès *et al.*, 2002; Cáceres *et al.*, 2007), aquests processos es van desenvolupar en nivells o zones que no han estat estudiades en aquesta tesi. Tenint en compte aquest últim fet, i considerant les dades que s'han obtingut fins al moment, és difícil determinar si aquests processos no van ocórrer en els sediments estudiats, o si les anàlisis de fitòlits no són la millor eina per detectar-los, i per tant aquesta és una limitació més dels fitòlits com a eina per estudiar els processos de formació. No obstant, considerem que la realització de treballs experimentals, l'ampliació dels estudis etnoarqueològics i l'estudi dels fitòlits en d'altres jaciments on prèviament s'hagin pogut detectar processos antròpics postdeposicionals, són la clau per entendre si les analítiques de fitòlits són vàlides per detectar els processos postdeposicionals culturals.

### 8.2.3. Aspectes metodològics

El tercer objectiu general que es pretenia aconseguir era la definició dels aspectes metodològics necessaris per utilitzar els fitòlits en el camp dels processos de formació. Els resultats obtinguts i la reflexió que ha comportat la realització d'aquest treball ens fa plantejar unes línies metodològiques bàsiques que serveixin de guia per a futures investigacions. Molts dels suggeriments que aquí es proposen es poden realitzar sense modificar pràcticament el pla de treball normal d'un laboratori, mentre que altres es poden realitzar sense la necessitat de grans despeses de temps o de diners; s'intenta sempre aprofitar al màxim els recursos estàndards que hauria de tenir un laboratori de paleobotànica. Així doncs, seguidament plantejem per ordre d'importància les línies bàsiques a seguir per a l'obtenció d'uns resultats el més rics possibles en l'estudi dels processos de formació a través dels fitòlits.

**1. Mostreig coherent.** És el principi de qualsevol bon treball en el camp dels fitòlits, i encara que sembla quelcom obvi, per a molts arqueòlegs no ho és pas. Sense un mostreig ben organitzat i registrat és molt difícil fer qualsevol observació sobre els processos de formació. Les mostres han d'estar ben localitzades en l'espai i l'estratigrafia. La seva relació amb mostres d'altres disciplines (pol·len, micromorfologia, datacions, etc.) s'ha d'establir amb total claredat. És important la selecció i estudi de mostres de control per poder determinar si s'han produït contaminacions de fitòlits més recents. A més a més, com hem vist en aquest treball, les mostres de vegetació actual i dels sòls on creix aquesta vegetació ens aporten valuosa informació sobre la tafonomia dels fitòlits.

**2. Identificació i quantificació dels fitòlits.** La identificació morfològica dels fitòlits per si sola no basta per realitzar una interpretació fiable dels resultats. Com ja s'ha vingut defensant al llarg dels anys, és important calcular el nombre de fitòlits en el sediment o en la fracció insoluble

en àcid per poder realitzar una interpretació correcta (Albert *et al.*, 1999; Albert *et al.*, 2000; Albert *et al.*, 2003). Es recomana enèrgicament la utilització d'un sistema de nomenclatura dels fitòlits basat en el codi internacional (ICPN) (Madella *et al.*, 2005), mentre que el càlcul de la quantitat de fitòlits es pot fer seguint Albert i Weiner (Albert i Weiner, 2001) o altres (Piperno, 2006). És recomanable, realitzar comptatges addicionals utilitzant la mateixa làmina on es fa el comptatge bàsic de fitòlits; per exemple es pot comptar quantes estructures multicel·lulars hi ha en una làmina i després fer la comparació amb el nombre de fitòlits individuals per fer una estimació dels processos tafonòmics que afecten als fitòlits (Capítol 6). La major o menor presència de estructures multicel·lulars també pot determinar el grau de silificació de la planta i indicar-nos activitats com el regadiu dels cereals cultivats (Rosen i Weiner, 1994) o el processament dels cereals (Portillo *et al.*, en premsa; Harvey i Fuller, 2005; Portillo, 2006). El comptatge dels fitòlits alterats, tot i que aquests no s'hagin pogut assignar morfològicament a cap tipus de fitòlit, ens pot ajudar a entendre el grau de preservació dels fitòlits i ens dóna informació sobre els processos de formació del sediment que els conté.

**3. Determinació dels components mineralògics del sediment.** La determinació de la composició mineralògica del sediment es pot realitzar seguint diferents mètodes, la majoria dels quals impliquen dur a terme unes anàlitzes que suposen un lleuger increment de la despesa econòmica i temporal però els resultats dels quals mereixen la nostra atenció. La forma més simple per realitzar aquesta anàlisi és utilitzant la tècnica de la pèrdua de volum durant el tractament per extreure'n els fitòlits, tal i com s'explica als treballs de l'Abric Romaní i de El Mirador. També es pot determinar la composició mineral a través de l'observació al microscopi petrogràfic. La utilització d'una tecnologia més complexa, com ara la Difracció de Raig X o el FTIR entre d'altres, dóna, però, uns resultats més precisos. Des de l'experiència acumulada en el camp de la investigació dels fitòlits el FTIR resulta el complement idoni. D'entrada el temps necessari per preparar i llegir una mostra en un FTIR estàndard no supera els quinze minuts, i el preu per mostra no és excessivament car. A més a més, aquesta tecnologia permet identificar millor minerals que no tenen unes fases massa cristal·lines, com l'òpal, que forma els fitòlits, o la dahllita autigènica, que es forma en les cendres que han sofert diagènesi (Weiner *et al.*, 1995; Karkanis *et al.*, 2000).

**4. Observació i quantificació d'altres elements microscòpics.** Durant el comptatge dels fitòlits en el microscopi sovint es poden observar altres elements de natura similar com les diatomees o les espícules d'esponja. La presència d'aquests elements en els sediments, juntament amb un determinat tipus de fitòlits, pot indicar que aquests darrers varen ser dipositats durant la formació d'un sòl (capítol 5). Uns altres elements que es poden identificar amb facilitat són els esferòlits i els oxalats de calci. Per tal de poder observar aquests elements només s'ha de muntar una làmina amb el sediment sense tractar. La quantificació d'aquests ens pot ajudar a determinar la presència de fulles de dicotiledònia, en el cas dels oxalats de calci complementant la identificació d'aquesta part de la planta a partir dels fitòlits, o bé la presència de fems en el sediment, en el cas dels esferòlits. Complementar les anàlitzes de fitòlits amb el comptatge de diatomees, espícules, esferòlits i oxalats de calci dóna una informació més completa que

si només utilitzem els fitòlits. La determinació de l'origen antròpic o natural d'una acumulació de fitòlits es pot fer en part per la presència o no de diatomees, mentre que l'origen de fitòlits procedents del fem es pot confirmar a partir de la presència d'esferòlits.

**5. Anàlisi morfomètric.** En algunes ocasions hi ha un tipus de morfologia de fitòlit que resulta recurrent en les mostres que analitzem, com ara els esferoides equinats procedents de les palmeres en alguns nivells d'Olduvai, o les cèl·lules llargues dendrítiques en les mostres de Tel Dor. El problema d'aquests tipus de fitòlits és que no són definitoris a nivell d'espècie. Els resultats obtinguts de l'anàlisi morfomètric dels fitòlits extrets de les mostres arqueològiques es pot comparar estadísticament amb els resultats obtinguts dels fitòlits extrets de plantes actuals. D'aquesta forma podem saber, de forma quantitativa i qualitativa, fins a quin punt els fitòlits arqueològics són similars a les espècies actuals estudiades. El software i el material necessari per a l'anàlisi morfomètric sol ser car, no obstant es recomana el seu ús si es disposa d'aquest material. L'alternativa clàssica, consisteix en mesurar els diferents fitòlits amb el micròmetre que solen portar alguns microscopis a l'ocular, però aquesta alternativa comporta molts més riscos degut a que la precisió de les mesures és molt menor. Definir exactament l'espècie de planta que estem observant a través dels fitòlits té avantatges en la interpretació paleoambiental però també en la cultural, ja que ens permet conèixer millor quins eren els cultius específics (Portillo *et al.*, en premsa; Berlin *et al.*, 2003; Ball *et al.*, 2006) i, fins i tot, quan es van començar a desenvolupar (Capítol 3) i per tant, aporta més informació a l'estudi dels processos de formació.

**6. Anàlisi del pH.** Si bé el pH es pot estimar, a *grosso modo*, a partir de la mineralogia de la mostra si obtenim uns resultats més precisos també obtindrem una informació addicional a l'hora d'entendre la preservació dels fitòlits en el sediment que estem estudiant. Normalment es mesura el pH utilitzant un pHímetre, i s'hauria de calcular el pH actual del sediment i el pH potencial per entendre les possibles variacions que hi ha hagut a través del temps (capítol 5). L'alternativa més econòmica al pHímetre són les tiretes de pH encara que la seva precisió és menor.

**7. Pluridisciplinarietat.** Tot i que aquesta és l'última recomanació de la llista no és la menys important. Està en l'últim lloc simplement perquè no tothom treballa amb un equip ben consolidat, o fins i tot molt sovint, no es disposa de la informació que han obtingut altres especialistes analitzant els mateixos sediments. Per entendre completament els processos de formació a partir de l'anàlisi dels fitòlits és necessari comparar els nostres resultats amb els obtinguts per altres arqueòlegs i/o investigadors. La coordinació entre diferents especialistes requereix tenir uns mínims coneixements de la resta de disciplines que participen en un estudi, ja que d'aquesta forma es poden conèixer les limitacions i els avantatges de cadascuna d'elles i es poden integrar els resultats de cada disciplina en una discussió conjunta d'una forma més coherent. Els treballs que formen aquesta tesi en són un exemple, ja que cadascun dels jaciments s'ha estudiat des de diferents disciplines, integrant els resultats en la discussió general.

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI

L'ESTUDI DELS PROCESSOS DE FORMACIÓ DELS SEDIMENTS ARQUEOLÒGICS

I DELS PALEOSÒLS A PARTIR DE L'ANÀLISI DELS FITÒLITS , ELS MINERALS I ALTRES MICRORESTES

Dan Cabanes i Cruelles

ISBN:978-84-692-1535-7/DL-T-378-2009



## **9. Conclusions**

**183**

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI

L'ESTUDI DELS PROCESSOS DE FORMACIÓ DELS SEDIMENTS ARQUEOLÒGICS

I DELS PALEOSÒLS A PARTIR DE L'ANÀLISI DELS FITÒLITS , ELS MINERALS I ALTRES MICRORESTES

Dan Cabanes i Cruelles

ISBN:978-84-692-1535-7/DL-T-378-2009

En aquesta tesi s'ha demostrat, a través de les investigacions dutes a terme en l'Abric Romaní i a El Mirador, i amb el suport dels resultats obtinguts a Olduvai i a Tel Dor, que els fitòlits són una eina útil a l'hora d'aportar informació sobre els processos de formació arqueològics.

A partir dels fitòlits, la mineralogia i les altres microrestes s'han pogut diferenciar els processos de formació culturals dels processos de formació naturals. Les característiques d'una acumulació de fitòlits d'origen antròpic i una acumulació de fitòlits d'origen natural han estat enumerades i definides. La identificació de l'origen dels fitòlits recuperats ha permès fer una interpretació més acurada, no només dels processos de formació, sinó també del comportament dels nostres avantpassats.

Els processos de formació que s'han identificat a partir dels fitòlits poden ser previs a l'enterrament, dintre del marc del context sistèmic, o posteriors a l'enterrament, dintre del context arqueològic.

En el context sistèmic els processos naturals que s'han definit estan relacionats amb l'ecologia, les propietats dels sòls i les característiques de les plantes; en canvi, els processos culturals poden estar marcats pels condicionants ambientals, però sobretot per les decisions preses pels humans sobre la gestió dels residus que produeixen i dels recursos vegetals que obtenen. Aquestes decisions poden estar influenciades pel context cultural o període cronològic, però també pels condicionants contextuals com ara la duració de l'ocupació (permanent, esporàdica, recurrent, etc.) o l'espai en el que es realitza aquesta.

Els processos posteriors a l'enterrament que s'han detectat a partir de l'estudi dels fitòlits són tots de caire natural, poden afectar tant als fitòlits com als altres elements que formen els sediments i es poden donar en tot el rang de jaciments que hem estudiat. Així doncs, s'han inferit processos postdeposicionals que afecten al conjunt dels sediments a partir de l'estat de preservació dels fitòlits, però també a través de les característiques de l'acumulació dels fitòlits, tant en termes de nombre com de tipus de fitòlits. Malauradament, no s'han pogut detectar processos posteriors a l'enterrament d'origen cultural a partir dels fitòlits, el FTIR i les altres microrestes; això es deu amb tota probabilitat a la pròpia natura d'aquests processos i a la manca d'investigacions en aquest sentit a partir de la metodologia que hem emprat aquí.

En aquesta tesi també s'han definit els avantatges i les limitacions de l'aplicació dels fitòlits a l'estudi dels processos de formació. Quant als avantatges cal destacar que les anàlisis de fitòlits permeten l'obtenció de dades d'alta resolució de forma transversal, és a dir, independentment de la cronologia i el tipus de jaciment (a l'aire lliure, en cova, abric o urbà), del seu grau d'antropització, de la duració o de la intensitat de l'ocupació. Pel que fa a les limitacions val a dir que no sempre es conserven els fitòlits, i la manca d'estudis al respecte fa que hi hagin limitacions a l'hora d'interpretar alguns dels processos tafonòmics responsables de la completa desaparició d'aquests elements.

Les implicacions metodològiques d'aquest treball han estat definides en una sèrie de punts. Un mostreig coherent, i una correcta identificació i quantificació dels fitòlits han estat les bases per a una millor interpretació dels processos de formació. Aquesta interpretació ha estat recolzada amb l'estudi de la mineralogia dels sediments (FTIR) i la identificació i comptatge d'altres microrestes (diatomees, esferòlits fecals, etc). S'ha demostrat que l'obtenció d'aquesta informació té l'avantatge que pot ser efectuada pel mateix investigador especialista en fitòlits, i no suposa un increment desmesurat de les despeses o del temps necessari per a realitzar una investigació sobre fitòlits dintre dels paràmetres estàndards. El treball en equip, o la pluridisciplinarietat, ha estat fonamental per poder aprofundir en el coneixement del context arqueològic. La integració dels resultats obtinguts a través dels fitòlits amb els resultats obtinguts per altres disciplines del camp de la geoarqueologia, la paleobotànica, o la tafonomia ens ha ajudat a comprendre millor les possibilitats de l'aplicació dels fitòlits a l'estudi dels processos de formació, a la vegada que ha complementat els resultats obtinguts per aquestes disciplines.

En definitiva, es pot afirmar que aquesta tesi representa una aproximació empírica a l'estudi dels processos de formació a través dels fitòlits. Aquesta aproximació és la que ens ha permès engegar un procés de discussió que ha fixat les possibilitats i les limitacions de l'aplicació dels fitòlits en aquest camp. Un cop conegudes les capacitats de la disciplina en aquest aspecte, hem determinat un marc metodològic ben definit l'aplicació del qual ha de permetre fer interpretacions en aquest sentit en d'altres jaciments.

D'alguna manera aquesta tesi ha estat un dels primers passos per a desenvolupar de forma coherent la utilització dels fitòlits en les investigacions dels processos de formació arqueològics. Encara queden molts més passos per arribar a comprendre en la seva totalitat la riquesa d'un jaciment arqueològic des d'aquesta perspectiva, evidentment és un llarg camí, però tot camí ha de tenir un principi i tot viatge comença amb un primer pas.

## **10. Referències**

**187**

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI

L'ESTUDI DELS PROCESSOS DE FORMACIÓ DELS SEDIMENTS ARQUEOLÒGICS

I DELS PALEOSÒLS A PARTIR DE L'ANÀLISI DELS FITÒLITS , ELS MINERALS I ALTRES MICRORESTES

Dan Cabanes i Cruelles

ISBN:978-84-692-1535-7/DL-T-378-2009

**A** 189

- Abrantes, F., Lopes, C., Mix, A. i Piasias, N. 2007. Diatoms in Southeast Pacific surface sediments reflect environmental properties. *Quaternary Science Reviews* **26**, 155-169.
- Abrantes, F. 2003. A 340,000 year continental climate record from tropical Africa - news from opal phytoliths from the equatorial Atlantic. *Earth and Planetary Science Letters* **209**, 165-179.
- Albert, R. M., Bamford, M. K. i Cabanes, D. En premsa. Palaeoecological significance of palms at Olduvai Gorge, Tanzania, based on phytolith remains. *Quaternary International*. doi:10.1016/j.quaint.2007.06.008
- Albert, R. M., Shahack-Gross, R., Cabanes, D., Gilboa, A., Lev-Yadun, S., Portillo, M., Sharon, I., Boaretto, E. i Weiner, S. 2008. Phytolith-rich layers from the Late Bronze and Iron Ages at Tel Dor (Israel): mode of formation and archaeological significance. *Journal of Archaeological Science* **35**, 57-75.
- Albert, R. M., Bamford, M. K. i Cabanes, D. 2006. Taphonomy of phytoliths and macroplants in different soils from Olduvai Gorge (Tanzania) and the application to Plio-Pleistocene palaeoanthropological samples. *Quaternary International* **148**, 78-94.

- Albert, R. M. i Henry, D. O. 2004. Herding and agricultural activities at the early neolithic site of Ayn Ab Nukhayla (Wadi Rum, Jordan). The results of phytolith and spherulite analyses. *Paléorient* **30/2**, 81-92.
- Albert, R. M., Bar-Yosef, O., Meignen, L. i Weiner, S. 2003. Quantitative phytolith study of hearths from the Natufian and middle palaeolithic levels of Hayonim Cave (Galilee, Israel). *Journal of Archaeological Science* **30**, 461-480.
- Albert, R. M. i Weiner, S. 2001. Study of phytolith in prehistoric ash layers from Kebara and Tabun caves using a quantitative approach. En "Phytolith: Applications in Earth Sciences and Human History". (J. D. Meunier i F. Colin, Eds.), pp. 251-266. A.A. Balkema Publishers, Lisse.
- Albert, R. M. 2000. "Study of Ash Layers through Phytolith Analyses from the Middle Palaeolithic Levels of Kebara and Tabun Caves". Tesi de doctorat, Departament de Prehistòria, Història Antiga i Arqueologia, Universitat de Barcelona.
- Albert, R. M., Wiener, S., Bar-Yosef, O. i Meignen, L. 2000. Phytoliths in the Middle Palaeolithic deposits of Kebara Cave, Mt Carmel, Israel: Study of the plant materials used for fuel and other purposes. *Journal of Archaeological Science* **27**, 931-947.
- Albert, R. M., Lavi, O., Estroff, L., Weiner, S., Tsatskin, A., Ronen, A. i Lev-Yadun, S. 1999. Mode of occupation of Tabun Cave, Mt Carmel, Israel during the Mousterian Period: A study of the sediments and phytoliths. *Journal of Archaeological Science* **26**, 1249-1260.
- Albert, R. M., Cummings, L. S., Juan, J. i Martin, A. 1996. Anàlisi de fitolitos de un hogar neolítico de la Cova del Frare (Matadepera, Barcelona). *Rubricatum: revista del Museu de Gavà* **1**, 123-129.
- Alday, A., Fernández, J. i Yusta, I. 2003. Suelos de habitación - suelos de corrales: los casos de Atxoste y Los Husos. *Veleia* **20**, 183-225.
- Alexandre, A., Meunier, J.-D., Colin, F. i Koud, J.-M. 1997a. Plant impact on the biogeochemical cycle of silicon and related weathering processes. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **61**, 677-682.
- Alexandre, A., Meunier, J. D., Lezine, A. M., Vincens, A. i Schwartz, D. 1997b. Phytoliths: indicators of grassland dynamics during the late Holocene in intertropical Africa. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology* **136**, 213-229.
- Allué, E. i Euba, I. 2008. Los datos antracológicos de la secuencia neolítica de El Mirador (Atapuerca, Burgos): un estudio sobre el medio vegetal y la explotación de las especies vegetales leñosas. En "IV Congreso de Neolítico Peninsular". (Mauro S. Hernández; Jorge A. Soler i Juan A. López, Eds) Vol I, pp. 345-352. Museo Arqueológico de Alicante, Alacant.



- Allué, E. 2002. "Dinámica de la vegetación y explotación del combustible leñoso durante el Pleistoceno Superior y el Holoceno del Noreste de la Península Ibérica a partir del análisis antracológico". Tesi de doctorat, Departament d'Història i Geografia, Universitat Rovira i Virgili.
- Angelucci, D. E. 2003. Geoarchaeology and micromorphology of Abric de la Catiuera (Catalonia, Spain). *Catena* **54**, 573-601.
- Arribas, A. i Palmqvist, P. 1998. Taphonomy and palaeoecology of an assemblage of large mammals: Hyaenid activity in the Lower Pleistocene site at Venta Micena (Orce, Guadix-Baza Basin, Granada, Spain). *Geobios* **31**, 3-47.
- Arsuaga, J. L., Martínez, I., Gracia, A., Carretero, J. M., Lorenzo, C., Garcia, N. i Ortega, A. I. 1997. Sima de los Huesos (Sierra de Atapuerca, Spain). The site. *Journal of Human Evolution* **33**, 109-127.
- Arteaga, I., Allué, E., Pastó, I., Vallverdú, J. i Carbonell, E. 2001. Els fogars del Paleolític Mitjà de l'Abric Romaní (Capellades, Anoia). *CYPSELA* **13**, 9-29.

## B

- Badal, E. 1999. El potencial pecuario de la vegetación mediterránea: las cuevas redil. *Saguntum-Plav Extra* **2**, 69-76.
- Ball, T., Vrydaghs, L., Van Den Hauwe, I., Manwaring, J. i De Langhe, E. 2006. Differentiating banana phytoliths: wild and edible *Musa acuminata* and *Musa balbisiana*. *Journal of Archaeological Science* **33**, 1228-1236.
- Ball, T. B., Gardner, J. S. i Anderson, N. 1999. Identifying inflorescence phytoliths from selected species of wheat (*Triticum monococcum*, *T. dicoccon*, *T. dicocoides*, and *T. aestivum*) and barley (*Hordeum vulgare* and *H. spontaneum*) (Gramineae). *American Journal of Botany* **86**, 1615-1623.
- Ball, T., Gardner, J. S. i Brotherson, J. D. 1996. Identifying phytoliths produced by the inflorescence bracts of three species of wheat (*Triticum monococcum* L, *T-dicoccon* Schrank, and *T-aestivum* L) using computer-assisted image and statistical analyses. *Journal of Archaeological Science* **23**, 619-632.
- Ball, T. B., Brotherson, J. D. i Gardner, J. S. 1993. A Typologic and Morphometric Study of Variation in Phytoliths from Einkorn Wheat (*Triticum-Monococcum*). *Canadian Journal of Botany- Revue Canadienne De Botanique* **71**, 1182-1192.
- Ball, T. B. i Brotherson, J. D. 1992. The Effect of Varying Environmental-Conditions on Phytolith Morphometrics in 2 Species of Grass (*Bouteloua-Curtipendula* and *Panicum-Virgatum*). *Scanning Microscopy* **6**, 1163-1181.

- Bamford, M. K., Albert, R. M. i Cabanes, D. 2006. Plio-Pleistocene macroplant fossil remains and phytoliths from Lowermost Bed II in the eastern palaeolake margin of Olduvai Gorge, Tanzania. *Quaternary International* **148**, 95-112.
- Bamford, M. K. 2005. Early Pleistocene fossil wood from Olduvai Gorge, Tanzania. *Quaternary International* **129**, 15-22.
- Bar-Yosef, O. 2001. A Personal View of Earth Sciences' Contributions to Archaeology. En "Earth sciences and archaeology". (P. Goldberg, V. T. Holliday i C. R. Ferring, Eds.), pp. 473-485. Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York.
- Barboni, D., Bonnefille, R., Alexandre, A. i Meunier, J. D. 1999. Phytoliths as paleoenvironmental indicators, West Side Middle Awash Valley, Ethiopia. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology* **152**, 87-100.
- Bartrolí, R., Cebrià, A., Muro, I., Riu-Barrera, E. i Vaquero, M. 1995. "A frec de ciència. L'Atles d'Amador Romani i Guerra". Ajuntament de Capellades, Capellades.
- Berlin, A. M., Ball, T., Thompson, R. i Herbert, S. C. 2003. Ptolemaic agriculture, "Syrian wheat", and *Triticum aestivum*. *Journal of Archaeological Science* **30**, 115-121.
- Berna, F., Behar, A., Shahack-Gross, R., Berg, J., Boaretto, E., Gilboa, A., Sharon, I., Shalev, S., Shilstein, S., Yahalom-Mack, N., Zorn, J. R. i Weiner, S. 2007. Sediments exposed to high temperatures: reconstructing pyrotechnological processes in Late Bronze and Iron Age Strata at Tel Dor (Israel). *Journal of Archaeological Science* **34**, 358-373.
- Berna, F., Matthews, A. i Weiner, S. 2004. Solubilities of bone mineral from archaeological sites: the recrystallization window. *Journal of Archaeological Science* **31**, 867-882.
- Binford, L. R., Mills, M. G. L. i Stone, N. M. 1988. Hyena Scavenging Behavior and Its Implications for the Interpretation of Faunal Assemblages from FLK 22 (the Zinj Floor) at Olduvai Gorge. *Journal of Anthropological Archaeology* **7**, 99-135.
- Binford, L. R. i Ho, C. K. 1985. Taphonomy at a Distance - Zhoukoudian, the Cave Home of Beijing Man. *Current Anthropology* **26**, 413-442.
- Binford, L. R. 1981. "Bones: ancient men and modern myths". Academic Press, New York.
- Binford, L. R. 1980. Willow Smoke and Dogs Tails - Hunter-Gatherer Settlement Systems and Archaeological Site Formation. *American Antiquity* **45**, 4-20.
- Binford, L. R. 1962. Archaeology as Anthropology. *American Antiquity* **28**, 217-225.
- Bischoff, J. L., Julià, R. i Mora, R. 1988. Uranium-series dating of the Mousterian occupation at Abric Romani, Spain. *Nature* **322**, 68-70.
- Blinnikov, M. S. 2005. Phytoliths in plants and soils of the interior Pacific Northwest, USA. *Review of Palaeobotany and Palynology* **135**, 71-98.

- Blinnikov, M., Busacca, A. i Whitlock, C. 2002. Reconstruction of the late Pleistocene grassland of the Columbia basin, Washington, USA, based on phytolith records in loess. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology* **177**, 77-101.
- Blumenschine, R. J., Peters, C. R., Masao, F. T., Clarke, R. J., Deino, A. L., Hay, R. L., Swisher, C. C., Stanistreet, I. G., Ashley, G. M., McHenry, L. J., Sikes, N. E., van der Merwe, N. J., Tactikos, J. C., Cushing, A. E., Deocampo, D. M., Njau, J. K. i Ebert, J. I. 2003. Late pliocene Homo and hominid land use from western Olduvai Gorge, Tanzania. *Science* **299**, 1217-1221.
- Blumenschine, R. J., Peters, C. R., Masao, F. T., Ashley, G. M. i Ebert, J. I. 1999. Preliminary tests of paleoanthropological predictions for hominid land use in the east-central portion of the lowermost Bed II Olduvai Basin, Tanzania. *Journal of Human Evolution* **36**, A2-A3.
- Blumenschine, R. J. i Peters, C. R. 1998. Archaeological predictions for hominid land use in the paleo-Olduvai Basin, Tanzania, during lowermost Bed II times. *Journal of Human Evolution* **34**, 565-607.
- Blumenschine, R. J. 1995. Percussion Marks, Tooth Marks, and Experimental Determinations of the Timing of Hominid and Carnivore Access to Long Bones at FLK Zinjanthropus, Olduvai Gorge, Tanzania. *Journal of Human Evolution* **29**, 21-51.
- Bobrov, A. A. 2003. Micropaleontological methods for studying biogenic silica in soils. *Eurasian Soil Science* **36**, 1307-1316.
- Bonnefille, R. 1976. Palynological Research at Olduvai Gorge. *National Geographic Society. Research Reports* **17**, 227-243.
- Boschian, G. i Montagnari-Kokelj, E. 2000. Prehistoric Shepherds and Caves in the Trieste Karst (Northeastern Italy). *Geoarchaeology* **15**, 331-371.
- Boschian, G. 1997. Sedimentology and soil micromorphology of the late Pleistocene and early Holocene deposits of Grotta dell'Edera (Trieste Karst, NE Italy). *Geoarchaeology* **12**, 227-249.
- Boyadjian, C. H. C., Eggers, S. i Reinhard, K. 2007. Dental wash: a problematic method for extracting microfossils from teeth. *Journal of Archaeological Science* **34**, 1622-1628.
- Boyd, M., Surette, C. i Nicholson, B. A. 2006. Archaeobotanical evidence of prehistoric maize (*Zea mays*) consumption at the northern edge of the Great Plains. *Journal of Archaeological Science* **33**, 1129-1140.
- Boyd, M. 2002. Identification of anthropogenic burning in the paleoecological record of the northern prairies: A new approach. *Annals of the Association of American Geographers* **92**, 471-487.
- Bozarth, S. R. i Guderjan, T. H. 2004. Biosilicate analysis of residue in Maya dedicatory cache vessels from Blue Creek, Belize. *Journal of Archaeological Science* **31**, 205-215.

- Bozarth, S. 1992. Classification of Opal Phytoliths Formed in Selected Dicotyledons Native to the Great Plains. *En "Phytolith Systematics. Emerging Issues"*. (J. George Rapp i S. C. Mulholland, Eds.), pp. 193-214. *Advances in Archaeological and Museum Science*. Plenum Press, New York - London.
- Bremond, L., Alexandre, A., Peyron, O. i Guiot, J. 2005. Grass water stress estimated from phytoliths in West Africa. *Journal of Biogeography* **32**, 311-327.
- Bremond, L., Alexandre, A., Vela, E. i Guiot, J. 2004. Advantages and disadvantages of phytolith analysis for the reconstruction of Mediterranean vegetation: an assessment based on modern phytolith, pollen and botanical data (Luberon, France). *Review of Palaeobotany and Palynology* **129**, 213-228.
- Brochier, J. É. 2002. Les sédiments anthropiques. Méthodes d'étude et perspectives. *En "Géologie de la Préhistoire: méthodes, techniques, applications"*. (J. C. Miskovsky, Ed.), pp. 453-477. Association pour L' Etude de l' environnement Géologique de la Préhistoire, Paris.
- Brochier, J. E., Claustre, F. i Heinz, C. 1998. Environmental impact of Neolithic and Bronze Age farming in the eastern Pyrenees forelands, based on multidisciplinary investigations at La Caune de Bélesta (Bélesta Cave), near Perpignan, France. *Vegetation History and Archaeobotany* **7**, 1-9.
- Brochier, J. É., Villa, P., Giacomarra, M. i Tagliacozzo, A. 1992. Shepherds and Sediments - Geo-Ethnoarchaeology of Pastoral Sites. *Journal of Anthropological Archaeology* **11**, 47-102.
- Buol, S. W., Southard, R. J., Graham, R. C. i McDaniel, P. A. 2003. "Soil Genesis and Classification". Iowa State Press, Ames.
- Burjachs, F. i Julià, R. 1996. Palaeoenvironmental Evolution During the Middle-Upper Palaeolithic Transition in the NE of the Iberian Peninsula. *En "The Last Neandertals The First Anatomically Modern Humans. Cultural change and human evolution: the crisis at 40 ka BP"*. (E. Carbonell i M. Vaquero, Eds.), pp. 377-383. Universitat Rovira i Virgili, Tarragona.
- Burjachs, F. i Julià, R. 1994. Abrupt Climatic Changes during the Last Glaciation Based on Pollen Analysis of the Abric Romaní, Catalonia, Spain. *Quaternary Research* **42**, 308-315.
- Bush, M. B. i Colinvaux, P. A. 1994. Tropical Forest Disturbance - Paleocological Records from Darien, Panama. *Ecology* **75**, 1761-1768.
- Bush, M. B., Piperno, D. R., Colinvaux, P. A., Deoliveira, P. E., Krissek, L. A., Miller, M. C. i Rowe, W. E. 1992. A 14 300-Yr Paleocological Profile of a Lowland Tropical Lake in Panama. *Ecological Monographs* **62**, 251-275.
- Butzer, K. W. 1989. "Arqueología: una ecología del hombre: método y teoría para un enfoque contextual". Bellaterra, Barcelona.

C

- Cabanes, D., Burjachs, F., Expósito, I., Rodríguez, A., Allué, E., Euba, I. i Verges, J. M. En premsa. Formation processes through archaeobotanical remains: The case of the Bronze Age levels in El Mirador cave, Sierra de Atapuerca, Spain. *Quaternary International*. doi:10.1016/j.quaint.2007.08.002.
- Cabanes, D., Allué, E., Vallverdú, J., Cáceres, I., Vaquero, M. i Pastó, I. 2007. Hearth structure and function at level J (50kyr, BP) from Abric Romaní (Capellades, Spain): phytolith, charcoal, bones and stone-tools. En "Plant People and Places - Recent Studies in Phytolith Analysis". (M. Madella i D. Zurro, Eds.), pp. 98-106. Oxbow Books, Oxford.
- Cáceres, I., Lozano, M. i Saladie, P. 2007. Evidence for Bronze Age cannibalism in El Mirador Cave (Sierra de Atapuerca, Burgos, Spain). *American Journal of Physical Anthropology* **133**, 899-917.
- Cáceres, I. 2002. "Tafonomía de Yacimientos Antrópicos en Karst. Complejo Galería (Sierra de Atapuerca, Burgos), Vanguard Cave (Gibraltar) y Abric Romaní (Capellades, Barcelona)". Tesi de doctorat, Àrea de Prehistòria, Departament d'Història i Geografia, Universitat Rovira i Virgili.
- Canti, M., Carter, S., Davidson, D. i Limbrey, S. 2006. Problems of unscientific method and approach in "Archaeological soil and pollen analysis of experimental floor deposits; with special reference to Butser Ancient Farm, Hampshire, UK" by R.I. Macphail, G.M. Cruise, M. Allen, J. Linderholm and P. Reynolds. *Journal of Archaeological Science* **33**, 295-298.
- Canti, M. G. 1999. The Production and Preservation of Faecal Spherulites: Animals, Environment and Taphonomy. *Journal of Archaeological Science* **26**, 251-258.
- Carbonell, E., Bermúdez de Castro, J. M., Pares, J. M., Pérez-González, A., Cuenca-Bescos, G., Ollé, A., Mosquera, M., Huguet, R., van der Made, J., Rosas, A., Sala, R., Vallverdú, J., Garcia, N., Granger, D. E., Martinon-Torres, M., Rodríguez, X. P., Stock, G. M., Verges, J. M., Allue, E., Burjachs, F., Cáceres, I., Canals, A., Benito, A., Díez, C., Lozano, M., Mateos, A., Navazo, M., Rodríguez, J., Rosell, J. i Arsuaga, J. L. 2008. The first hominin of Europe. *Nature* **452**, 465-469.
- Carbonell, E., Cebrià, A., Allué, E., Cáceres, I., Castro, Z., Díaz, R., Esteban, M., Ollé, A., Pastó, I., Rodríguez, X. P., Rosell, J., Sala, R., Vallverdú, J., Vaquero, M. i Vergés, J. M. 1996. Behavioural and organizational complexity in the Middle Paleolithic from the Abric Romaní. En "The last Neanderthals, the first anatomically modern humans: A tale about human diversity. Cultural change and human evolution: the crisis at 40ka BP". (E. Carbonell i M. Vaquero, Eds.), pp. 385-434. Universitat Rovira i Virgili, Tarragona.
- Carnelli, A. L., Theurillat, J. P. i Madella, A. 2004. Phytolith types and type-frequencies in subalpine-alpine plant species of the European Alps. *Review of Palaeobotany and Palynology* **129**, 39-65.

Carrancho, Á., Villalaín, J.J., Angelucci D.E., Dekkers, M.J., Vallverdú, J., Vergès, J.M. En preparació. Magnetic analysis as a tool to investigate archaeological fired sediments. A case study of Mirador cave (Atapuerca sites-Spain).

Carrion, J. S., Gil, G., Rodríguez, E., Fuentes, N., Garcia-Anton, A. i Arribas, A. 2005. Palynology of badger coprolites from central Spain. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology* **226**, 259-271.

Carrion, J. S. 2002. A taphonomic study of modern pollen assemblages from dung and surface sediments in arid environments of Spain. *Review of Palaeobotany and Palynology* **120**, 217-232.

Carter, J. A. i Lian, O. B. 2000. Palaeoenvironmental reconstruction from last interglacial using phytolith analysis, southeastern North Island, New Zealand. *Journal of Quaternary Science* **15**, 733-743.

Chu, V., Regev, L., Weiner, S. i Boaretto, E. 2008. Differentiating between anthropogenic calcite in plaster, ash and natural calcite using infrared spectroscopy: implications in archaeology. *Journal of Archaeological Science* **35**, 905-911.

Cohen-Ofri, I., Weiner, L., Boaretto, E., Mintz, G. i Weiner, S. 2006. Modern and fossil charcoal: aspects of structure and diagenesis. *Journal of Archaeological Science* **33**, 428-439.

Coles, G. M. i Gilbertson, D. D. 1994. The Airfall-Pollen Budget of Archaeologically Important Caves - Creswell Crags, England. *Journal of Archaeological Science* **21**, 735-755.

Conley, D. J. 2002. Terrestrial ecosystems and the global biogeochemical silica cycle. *Global Biogeochemical Cycles* **16**. doi:10.1029/2002GB001894

Constantino, P. i Wood, B. 2007. The evolution of *Zinjanthropus boisei*. *Evolutionary Anthropology* **16**, 49-62.

Courty, M. A. i Vallverdú, J. 2001. The microstratigraphic record of abrupt climate changes in cave sediments of the Western Mediterranean. *Geoarchaeology-an International Journal* **16**, 467-500.

Courty, M. A., Goldberg, P. i Macphail, R. 1989. "Soils and micromorphology in archaeology". Cambridge University Press, Cambridge; New York.

Cummings, L. S. 1992. Illustrated Phytoliths from Assorted Food Plants. En "Phytolith Systematics. Emerging Issues". (J. George Rapp i S. C. Mulholland, Eds.), pp. 175-192. Advances in Archaeological and Museum Science. Plenum Press, New York - London.

Cushing, A. E. i Blumenschine, R. J. 1999. The landscape distribution of larger mammal taxa in eastern Lowermost Bed II, Olduvai Gorge, Tanzania. *American Journal of Physical Anthropology*, 113-114.

D

- David, N. i Kramer, C. 2001. "Ethnoarchaeology in action". Cambridge University Press, Cambridge.
- Debert, J. i Sherriff, B. L. 2007. Rspadita: a new lithic tool from the Isthmus of Rivas, Nicaragua. *Journal of Archaeological Science* **34**, 1889-1901.
- Deocampo, D. M., Blumenschine, R. J. i Ashley, G. M. 2002. Wetland diagenesis and traces of early hominids, Olduvai Gorge, Tanzania. *Quaternary Research* **57**, 271-281.
- Derrico, F., Giacobini, G., Hather, J., Powers-Jones, A. H. i Radmilli, A. M. 1995. Possible Bone Threshing Tools from the Neolithic Levels of the Grotta Dei Piccioni (Abruzzo, Italy). *Journal of Archaeological Science* **22**, 537-549.
- Domínguez-Rodrigo, M. i Pickering, T. R. 2003. Early hominid hunting and scavenging: A zooarcheological review. *Evolutionary Anthropology* **12**, 275-282.
- Domínguez-Rodrigo, M., Serrallonga, J., Juan-Tresserras, J., Alcalá, L. i Luque, L. 2001. Woodworking activities by early humans: a plant residue analysis on Acheulian stone tools from Peninj (Tanzania). *Journal of Human Evolution* **40**, 289-299.

E 197

- Efremov, I. A. 1940. Taphonomy: New Branch of Paleontology. *Pan American Geologist* **74**, 81-93.
- Elbaum, R., Melamed-Bessudo, C., Tuross, N., Levy, A. A. i Weiner, S. En premsa. New methods to isolate organic materials from silicified phytoliths reveal fragmented glycoproteins but no DNA. *Quaternary International*. doi:10.1016/j.quaint.2007.07.006.
- Elbaum, R., Weiner, S., Albert, R. M. i Elbaum, M. 2003. Detection of burning of plant materials in the archaeological record by changes in the refractive indices of siliceous phytoliths. *Journal of Archaeological Science* **30**, 217-226.
- Epstein, E. 1994. The anomaly of silicon in plant biology. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* **91**, 11-17.
- Etiégni, L. i Campbell, A. G. 1991. Physical and Chemical Characteristics of Wood Ash. *Bioresource Technology* **37**, 173-178.
- Expósito, I. 2007. "Reconstrucción paleoambiental de los niveles neolíticos de la Cueva de El Mirador, Sierra de Atapuerca, Burgos". D.E.A., Departament de Geografia i Història, Universitat Rovira i Virgili.

**F**

Farmer, V. C. 2005. Forest vegetation does recycle substantial amounts of silicon from and back to the soil solution with phytoliths as an intermediate phase, contrary to recent reports. *European Journal of Soil Science* **56**, 271-272.

Farmer, V. C., Delbos, E. i Miller, J. D. 2005. The role of phytolith formation and dissolution in controlling concentrations of silica in soil solutions and streams. *Geoderma* **127**, 71-79.

Fernández-Jalvo, Y., Scott, L. i Denys, C. 1999. Taphonomy of pollen associated with predation. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology* **149**, 271-282.

Fisher, R. F., Bourn, C. N. i Fisher, W. F. 1995. Opal Phytoliths as an Indicator of the Floristics of Prehistoric Grasslands. *Geoderma* **68**, 243-255.

Flores, J. A., Barcena, M. A. i Sierro, F. J. 2000. Ocean-surface and wind dynamics in the Atlantic Ocean off Northwest Africa during the last 140 000 years. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology* **161**, 459-478.

Folk, R. L. i Hoops, G. K. 1982. An Early Iron-Age Layer of Glass Made from Plants at Tel Yin'am, Israel, pp. 455-466. Boston University.

**198**

Fox, C. L., Pérez-Pérez, A. i Juan, J. 1994. Dietary Information through the Examination of Plant Phytoliths on the Enamel Surface of Human Dentition. *Journal of Archaeological Science* **21**, 29-34.

Fredlund, G. G. i Tieszen, L. T. 1994. Modern Phytolith Assemblages from the North-American Great-Plains. *Journal of Biogeography* **21**, 321-335.

Fredlund, G. G. i Tieszen, L. L. 1997a. Calibrating grass phytolith assemblages in climatic terms: Application to late Pleistocene assemblages from Kansas and Nebraska. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology* **136**, 199-211.

Fredlund, G. G. i Tieszen, L. L. 1997b. Phytolith and carbon isotope evidence for late Quaternary vegetation and climate change in the southern Black Hills, South Dakota. *Quaternary Research* **47**, 206-217.

**G**

Gallego, L. i Distel, R. A. 2004. Phytolith assemblages in grasses native to central Argentina. *Annals of Botany* **94**, 865-874.



- Gérard, F., Mayer, K. U., Hodson, M. J. i Ranger, J. 2008. Modelling the biogeochemical cycle of silicon in soils: Application to a temperate forest ecosystem. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **72**, 741-758.
- Gilboa, A. 2005. Sea Peoples and Phoenicians along the southern Phoenician Coast, a reconciliation: an interpretation of SKL material culture. *Bulletin of the American Schools of Oriental Research* **337**, 47-78.
- Gilboa, A. i Sharon, I. 2003. An archaeological contribution to the Early Iron Age chronological debate: alternative chronologies for Phoenicia and their effects on the Levant, Cyprus, and Greece. *Bulletin of the American Schools of Oriental Research* **332**, 7-80.
- Gilboa, A. 1998. Iron I-IIA Pottery Evolution at Dor - Regional Contexts and the Cypriot Connection. *En "Mediterranean peoples in transition: thirteenth to early tenth centuries BCE"*. (T. K. Dothan, S. Gitin, A. Mazar i E. Stern, Eds.), pp. 413-425. Israel Exploration Society, Jerusalem.
- Gladfelter, B. G. 1977. Geo-Archaeology - Geo-Morphologist and Archeology. *American Antiquity* **42**, 519-538.
- Goldberg, P. i Macphail, R. 2006. "Practical and theoretical geoarchaeology". Blackwell Publishing, Malden, MA; Oxford.
- Goldberg, P. i Sherwood, S. C. 2006. Deciphering human prehistory through the geoarchaeological study of cave sediments. *Evolutionary Anthropology* **15**, 20-36.
- Goldberg, P., Weiner, S., Bar-Yosef, O., Xu, Q. i Liu, J. 2001. Site formation processes at Zhoukoudian, China. *Journal of Human Evolution* **41**, 483-530.
- Goldberg, P. 2000. Micromorphology and site formation at Die Kelders Cave I, South Africa. *Journal of Human Evolution* **38**, 43-90.
- Goldberg, P. i Bar-Yosef, O. 1998. Site formation processes in Kebara and Hayonim Caves and their significance in Levantine prehistoric caves. *En "Neandertals and modern humans in Western Asia"*. (T. Akazawa, K. Aoki i O. Bar-Yosef, Eds.), pp. 107-125. Plenum Press, New York.
- Goldberg, P. i Whitbread, I. 1993. Micromorphological Study of a Bedouin Tent Floor. *En "Formation processes in archaeological context"*. (P. Goldberg, D. T. Nash i M. D. Petraglia, Eds.), pp. 165-188. Monographs in world archaeology. Prehistory Press, Madison, Wis.
- Goldberg, P., Nash, D. T. i Petraglia, M. D. 1993. "Formation processes in archaeological context". Prehistory Press, Madison, Wis.
- Goni, M. F. S. 1994. The Environment of Prehistoric Man in Cantabria According to the Pollen Taphonomy of Cave Sites. *Anthropologie* **98**, 379-417.
- Grave, P. i Kealhofer, L. 1999. Assessing Bioturbation in Archaeological Sediments using Soil Morphology and Phytolith Analysis. *Journal of Archaeological Science* **26**, 1239-1248.

Gugel, I. L., Grupe, G. i Kunzelmann, K. H. 2001. Simulation of dental microwear: Characteristic traces by opal phytoliths give clues to ancient human dietary behavior. *American Journal of Physical Anthropology* **114**, 124-138.

## H

Halstead, P. 1996. Pastoralism or household herding? Problems of scale and specialization in early greek animal husbandry. *World Archaeology* **28**, 20-42.

Hardy, B. L. 2004. Neanderthal behaviour and stone tool function at the Middle Palaeolithic site of La Quina, France. *Antiquity* **78**, 547-565.

Harvey, E. L. i Fuller, D. Q. 2005. Investigating crop processing using phytolith analysis: the example of rice and millets. *Journal of Archaeological Science* **32**, 739-752.

Hassan, F. A. 1979. Geoarchaeology - Geologist and Archaeology. *American Antiquity* **44**, 267-270.

Hay, R. L. 1976. "Geology of the Olduvai Gorge: a study of sedimentation in a semiarid basin". University of California Press, Berkeley.

## 200

Hilton, M. R. 2003. Quantifying postdepositional redistribution of the archaeological record produced by freeze-thaw and other mechanisms: An experimental approach. *Journal of Archaeological Method and Theory* **10**, 165-202.

Hodson, M. J., Westerman, J. i Tubb, H. J. 2001. The Use of Inflorescence Phytoliths from the Triticeae in Food Science. En "Phytolith: Applications in Earth Sciences and Human History". (J. D. Meunier i F. Colin, Eds.), pp. 87-99. A.A. Balkema Publishers, Lisse.

Holst, I., Moreno, J. E. i Piperno, D. R. 2007. Identification of teosinte, maize, and *Tripsacum* in Mesoamerica by using pollen, starch grains, and phytoliths. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* **104**, 17608-17613.

Huguet, R. 2007. "Primeras ocupaciones humanas en la Península Ibérica: Paleoeconomía en la Sierra de Atapuerca (Burgos) y la Cuenca de Guadix-Baza (Granada) durante el Pleistoceno Inferior". Tesi de doctorat, Àrea de Prehistòria. Departament de Geografia i Història, Universitat Rovira i Virgili.

## I

Iriarte, J. 2003. Assessing the feasibility of identifying maize through the analysis of cross-shaped size and three-dimensional morphology of phytoliths in the grasslands of southeastern South America. *Journal of Archaeological Science* **30**, 1085-1094.

Ishida, S., Parker, A. G., Kennet, D. i Hodson, M. J. 2003. Phytolith analysis from the archaeological site of Kush, Ras al-Khaimah, United Arab Emirates. *Quaternary Research* **59**, 310-321.

Itzstein-Davey, F., Taylor, D., Dodson, J., Atahan, P. i Zheng, H. 2007. Wild and domesticated forms of rice (*Oryza* sp.) in early agriculture at Qingpu, lower Yangtze, China: evidence from phytoliths. *Journal of Archaeological Science* **34**, 2101-2108.

## J

Jiang, Q. 1995. Searching for evidence of early rice agriculture at prehistoric sites in China through phytolith analysis: an example from central China. *Review of Palaeobotany and Palynology* **89**, 481-485.

Jones, J. G. 1993. Analysis of Pollen and Phytoliths in Residue from a Colonial Period Ceramic Vessel. En "Current Research in Phytolith Analysis: Applications in Archaeology and Paleoecology". (D. M. Pearsall i D. R. Piperno, Eds.), pp. 31-36. MASCA Research Papers in Science and Archaeology. Museum Applied Science Center for Archaeology and The University Museum of Archaeology and Anthropology University of Pennsylvania, Philadelphia.

Jones, R. L. i Beavers, A. H. 1963. Some Mineralogical and Chemical Properties of Plant Opal. *Soil Science* **96**, 375-379.

201

## K

Kaplan, L., Smith, M. B. i Sneddon, L. A. 1992. Cereal Grain Phytoliths of Southwest Asia and Europe. En "Phytolith Systematics. Emerging Issues". (J. George Rapp i S. C. Mulholland, Eds.), pp. 149-174. Advances in Archaeological and Museum Science. Plenum Press, New York - London.

Karkanas, P., Shahack-Gross, R., Ayalon, A., Bar-Matthews, M., Barkai, R., Frumkin, A., Gopher, A. i Stiner, M. C. 2007. Evidence for habitual use of fire at the end of the Lower Paleolithic: Site-formation processes at Qesem Cave, Israel. *Journal of Human Evolution* **53**, 197-212.

Karkanas, P. 2006. Late Neolithic household activities in marginal areas: the micromorphological evidence from the Kouveleiki caves, Peloponnese, Greece. *Journal of Archaeological Science* **33**, 1628-1641.

Karkanas, P., Koumouzelis, M., Kozłowski, J. K., Sitlivy, V., Sobczyk, K., Berna, F. i Weiner, S. 2004. The earliest evidence for clay hearths: Aurignacian features in Klisoura Cave 1, southern Greece. *Antiquity* **78**, 513-525.

Karkanas, P. 2002. Micromorphological studies of Greek prehistoric sites: New insights in the interpretation of the archaeological record. *Geoarchaeology-an International Journal* **17**, 237-259.

Karkanas, P., Rigaud, J. P., Simek, J. F., Albert, R. M. i Weiner, S. 2002. Ash bones and guano: A study of the minerals and phytoliths in the sediments of Grotte-XVI, Dordogne, France. *Journal of Archaeological Science* **29**, 721-732.

Karkanas, P. 2001. Site Formation Processes in Theopetra Cave: A Record of Climatic Change during the Late Pleistocene and Early Holocene in Thessaly, Greece. *Geoarchaeology-an International Journal* **16**, 373-399.

Karkanas, P., Bar-Yosef, O., Goldberg, P. i Weiner, S. 2000. Diagenesis in prehistoric caves: The use of minerals that form in situ to assess the completeness of the archaeological record. *Journal of Archaeological Science* **27**, 915-929.

Karkanas, P., Kyparissi-Apostolika, N., Bar-Yosef, O. i Weiner, S. 1999. Mineral assemblages in Theopetra, Greece: A framework for understanding diagenesis in a prehistoric cave. *Journal of Archaeological Science* **26**, 1171-1180.

Kealhofer, L., Torrence, R. i Fullagar, R. 1999. Integrating phytoliths within use-wear/residue studies of stone tools. *Journal of Archaeological Science* **26**, 527-546.

Kealhofer, L. i Piperno, D. R. 1994. Early Agriculture in Southeast-Asia - Phytolith Evidence from the Bang-Pakong Valley, Thailand. *Antiquity* **68**, 564-572.

Kelly, E. F., Blecker, S. W., Yonker, C. M., Olson, C. G., Wohl, E. E. i Todd, L. C. 1998. Stable isotope composition of soil organic matter and phytoliths as paleoenvironmental indicators. *Geoderma* **82**, 59-81.

Kelly, E. F., Amundson, R. G., Marino, B. D. i Deniro, M. J. 1991. Stable Isotope Ratios of Carbon in Phytoliths as a Quantitative Method of Monitoring Vegetation and Climate Change. *Quaternary Research* **35**, 222-233.

Klein, R. G. 1999. "The human career human biological and cultural origins". University of Chicago Press, Chicago.

Krishnan, S., Samson, N. P., Ravichandran, P., Narasimhan, D. i Dayanandan, P. 2000. Phytoliths of Indian grasses and their potential use in identification. *Botanical Journal of the Linnean Society* **132**, 241-252.

## L

Lalueza, C., Juan, F. J. i Albert, R. H. 1996. Phytolith analysis on dental calculus, enamel surface, and burial soil: Information about diet and paleoenvironment. *American Journal of Physical Anthropology* **101**, 101-113.

- Lejju, B. J., Robertshaw, P. i Taylor, D. 2006. Africa's earliest bananas? *Journal of Archaeological Science* **33**, 102-113.
- Li, X. Q., Zhou, X. Y., Zhang, H. B., Zhou, J., Shang, X. i Dodson, J. 2007. The record of cultivated rice from archaeobiological evidence in northwestern China 5000 years ago. *Chinese Science Bulletin* **52**, 1372-1378.
- Liebowitz, H. i Folk, R. L. 1980. Archeological Geology of Tel Yin'am, Galilee, Israel, pp. 23-42. Boston University.
- López, J. M. 2006. "Estudio sobre los Roedores, Insectívoros, Quirópteros y Anuros del Holoceno de la cueva de El Mirador (Atapuerca, Burgos)". D.E.A., Departament de Geografia i Història, Universitat Rovira i Virgili.
- Lu, H. Y., Yang, X. Y., Ye, M. L., Liu, K. B., Xia, Z. K., Ren, X. Y., Cai, L. H., Wu, N. Q. i Liu, T. S. 2005. Millet noodles in Late Neolithic China - A remarkable find allows the reconstruction of the earliest recorded preparation of noodles. *Nature* **437**, 967-968.
- Lu, H. Y., Wang, Y. J., Wang, G. A., Yang, H. i Li, Z. 2000. Analysis of carbon isotope in phytoliths from C3 and C4 plants and modern soils. *Chinese Science Bulletin* **45**, 1804-1808.
- Lucas, P. W., Turner, I. M., Dominy, N. J. i Yamashita, N. 2000. Mechanical Defenses to Herbivory. *Annals of Botany* **86**, 913-920.
- Lyman, R. L. 1994. "Vertebrate taphonomy". Cambridge University Press, New York.

## M

- Macphail, R. I., Cruise, G. M., Allen, M. J. i Linderholm, J. 2006. A rebuttal of the views expressed in "Problems of unscientific method and approach in Archaeological soil and pollen analysis of experimental floor deposits; with special reference to Butser Ancient Farm, Hampshire, UK by R.I. Macphail, G.M. Cruise, M. Allen, J. Linderholm and P. Reynolds" By Matthew Canti, Stephen Carter, Donald Davidson and Susan Limbrey. *Journal of Archaeological Science* **33**, 299-305.
- Macphail, R. I., Cruise, G. M., Allen, M. J., Linderholm, J. i Reynolds, P. 2004. Archaeological soil and pollen analysis of experimental floor deposits; with special reference to Butser Ancient Farm, Hampshire, UK. *Journal of Archaeological Science* **31**, 175-191.
- Macphail, R. I., Galinie, H. i Verhaeghe, F. 2003. A future for Dark Earth? *Antiquity* **77**, 349-358.
- Macphail, R. I., Courty, M.-A., Hather, J., Wattez, J., Ryder, M., Cameron, N. i Branch, N. P. 1997. The soil micromorphological evidence of domestic occupation and stabling activities. *En "Arene Candide: A functional and environmental assessment of the Holocene sequence (excavations Bernarbo' Brea-Cardini 1940-50)".* (R. Maggi, Ed.), pp. 53-88. Il Calamo, Roma.

Madella, M., Alexandre, A. i Ball, T. 2005. International Code for Phytolith Nomenclature 1.0. *Annals of Botany* **96**, 253-260.

Madella, M., Jones, M. K., Goldberg, P., Goren, Y. i Hovers, E. 2002. The exploitation of plant resources by Neanderthals in Amud Cave (Israel): The evidence from Phytolith studies. *Journal of Archaeological Science* **29**, 703-719.

Madella, M. 2001. Understanding archaeological structures by means of phytolith analysis: A test from the iron age site of Kilise Tepe-Turkey. *En "Phytoliths: Applications in Earth Sciences and Human History"*. (J. D. Meunier i F. Colin, Eds.), pp. 173-182. A.A. Balkema Publishers, Lisse.

Mainland, I. L. 2003. Dental microwear in grazing and browsing Gotland sheep (*Ovis aries*) and its implications for dietary reconstruction. *Journal of Archaeological Science* **30**, 1513-1527.

Mallol, C. 2006. What's in a beach? Soil micromorphology of sediments from the Lower Paleolithic site of 'Ubeidiya, Israel. *Journal of Human Evolution* **51**, 185-206.

Mallol, C. 2004. "Micromorphological Observations from the Archaeological Sediments of 'Ubeidiya (Israel), Dmanisi (Georgia) and Gran Dolina-TD10 (Spain) for the Reconstruction of Hominid Occupation Contexts". Tesi de doctorat, Department of Anthropology, Harvard University.

204

Marean, C. W. i Frey, C. J. 1997. Animal bones from caves to cities: Reverse utility curves as methodological artifacts. *American Antiquity* **62**, 698-711.

Marean, C. W., Spencer, L. M., Blumenshine, R. J. i Capaldo, S. D. 1992. Captive Hyena Bone Choice and Destruction, the Schlepp Effect and Olduvai Archaeofaunas. *Journal of Archaeological Science* **19**, 101-121.

Martin-Closas, C. i Gómez, B. 2004. Taphonomie des plantes et interpretations paleoecologiques. Une synthese. Plant taphonomy and palaeoecological interpretations. A synthesis. *Geobios* **37**, 65-88.

Martín, P. 2007. "Gestión de los Recursos Faunísticos durante el Neolítico en la Sierra de Atapuerca (Burgos): Los Niveles 19 y 20 de la Cueva de El Mirador". D.E.A., Departament de Geografia i Història, Universitat Rovira i Virgili.

Martínez, I., Rosa, M., Arsuaga, J. L., Jarabo, P., Quam, R., Lorenzo, C., Gracia, A., Carretero, J. M., de Castro, J. M. B. i Carbonell, E. 2004. Auditory capacities in Middle Pleistocene humans from the Sierra de Atapuerca in Spain. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* **101**, 9976-9981.

Massey, F. P., Ennos, A. R. i Hartley, S. E. 2006. Silica in grasses as a defence against insect herbivores: contrasting effects on folivores and a phloem feeder. *Journal of Animal Ecology* **75**, 595-603.

- Matthews, W., French, C. A. I., Lawrence, T., Cutler, D. F. i Jones, M. K. 1997. Microstratigraphic traces of site formation processes and human activities. *World Archaeology* **29**, 281-308.
- Merceron, G., de Bonis, L., Viriot, L. i Blondel, C. 2005. Dental microwear of the late Miocene bovids of northern Greece: Vallesian/Turolian environmental changes and disappearance of *Ouranopithecus macedoniensis*? *Bulletin De La Societe Geologique De France* **176**, 475-484.
- Meunier, J. D., Alexandre, A., Colin, F. i Braun, J. J. 2001. Deciphering the dynamics of tropical soils through the study of the biogeochemical cycle of silica. *Bulletin De La Societe Geologique De France* **172**, 533-538.
- Middleton, W. D. i Rovner, I. 1994. Extraction of Opal Phytoliths from Herbivore Dental Calculus. *Journal of Archaeological Science* **21**, 469-473.
- Minnis, P. E. 1981. Seeds in Archaeological Sites - Sources and Some Interpretive Problems. *American Antiquity* **46**, 143-152.
- Mulholland, S. C. i Prior, C. 1993. AMS Radiocarbon Dating of Phytoliths. En "Current Research in Phytolith Analysis: Applications in Archaeology and Paleoecology." (D. M. Pearsall i D. R. Piperno, Eds.), pp. 21-24. MASCA Research Papers in Science and Archaeology. Museum Applied Science Center for Archaeology and The University Museum of Archaeology and Anthropology University of Pennsylvania, Philadelphia.
- Mulholland, S. C. i George Rapp, J. 1992. Phytolith Systematics: an introduction. En "Phytolith Systematics. Emerging Issues". (J. George Rapp i S. C. Mulholland, Eds.), pp. 1-13. Advances in Archaeological and Museum Science. Plenum Press, New York - London.
- Mulholland, S. C., Rapp, G. i Ollendorf, A. L. 1988. Variation in Phytoliths from Corn Leaves. *Canadian Journal of Botany-Revue Canadienne De Botanique* **66**, 2001-2008.

- Nash, D. T. i Petraglia, M. D. 1987. "Natural formation processes and the archaeological record". B.A.R., Oxford, England.
- Navarro, C., Carrion, J. S., Munuera, M. i Prieto, A. R. 2001. Cave surface pollen and the palynological potential of karstic cave sediments in palaeoecology. *Review of Palaeobotany and Palynology* **117**, 245-265.

## O

- Okumura, M. M. M. i Eggers, S. 2005. The people of Jabuticabeira II: reconstruction of the way of life in a Brazilian shellmound. *Homo-Journal of Comparative Human Biology* **55**, 263-281.
- Ollendorf, A. L. 1992. Toward a Classification Scheme of Sedge (Cyperaceae) Phytoliths. *En "Phytolith Systematics. Emerging Issues"*. (J. George Rapp i S. C. Mulholland, Eds.), pp. 91-111. *Advances in Archaeological and Museum Science*. Plenum Press, New York - London.
- Ollendorf, A. L. 1987. Archaeological Implications of a Phytolith Study at Tel Miqne (Ekron), Israel, pp. 453-463. Boston University.
- Ollendorf, A. L., Mulholland, S. C. i Rapp, G. 1987. Phytoliths from Some Israeli Sedges. *Israel Journal of Botany* **36**, 125-132.
- Osterrieth, M., Madella, M., Zurro, D. i Fernanda Álvarez, M. En premsa. Taphonomical aspects of silica phytoliths in the loess sediments of the Argentinean Pampas. *Quaternary International*. doi:10.1016/j.quaint.2007.09.002.

## 206 P

- Palombo, M. R., Filippi, M. L., Iacumin, P., Longinelli, A., Barbieri, M. i Maras, A. 2005. Coupling tooth microwear and stable isotope analyses for palaeodiet reconstruction: the case study of late Middle Pleistocene *Elephas (Palaeoloxodon) antiquus* teeth from Central Italy (Rome area). *Quaternary International* **126-28**, 153-170.
- Parr, J. F. 2006. Effect of fire on phytolith coloration. *Geoarchaeology-an International Journal* **21**, 171-185.
- Parr, J. F., Lentfer, C. J. i Boyd, W. E. 2001. A comparative analysis of wet and dry ashing techniques for the extraction of phytoliths from plant material. *Journal of Archaeological Science* **28**, 875-886.
- Pastó, I., Allué, E. i Vallverdú, J. 2000. Mousterian Hearths at Abric Romani, Catalonia (Spain). *En "Neanderthals on the Edge"*. (C. B. Stringer, R. N. E. Barton i J. C. Finlayson, Eds.), pp. 59-67. Oxbow books, Oxford.
- Pearsall, D. M., Chandler-Ezell, K. i Chandler-Ezell, A. 2004a. Maize can still be identified using phytoliths: response to Rovner. *Journal of Archaeological Science* **31**, 1029-1038.



- Pearsall, D. M., Chandler-Ezell, K. i Zeidler, J. A. 2004b. Maize in ancient Ecuador: results of residue analysis of stone tools from the Real Alto site. *Journal of Archaeological Science* **31**, 423-442.
- Pearsall, D. M., Chandler-Ezell, K. i Chandler-Ezell, A. 2003. Identifying maize in neotropical sediments and soils using cob phytoliths. *Journal of Archaeological Science* **30**, 611-627.
- Pearsall, D. M. 2002. Maize is still ancient in prehistoric Ecuador: The view from Real Alto, with comments on Staller and Thompson. *Journal of Archaeological Science* **29**, 51-55.
- Perry, R. S., Mcloughlin, N., Lynne, B. Y., Sephton, M. A., Oliver, J. D., Perry, C. C., Campbell, K., Engel, M. H., Farmer, J. D., Brasier, M. D. i Staley, J. T. 2007. Defining biominerals and organominerals: Direct and indirect indicators of life. *Sedimentary Geology* **201**, 157-179.
- Peters, C. R. i Blumenschine, R. J. 1995. Landscape perspectives on possible land use patterns for Early Pleistocene hominids in the Olduvai Basin, Tanzania. *Journal of Human Evolution* **29**, 321-362.
- Pickering, T. R. i Egeland, C. P. 2006. Experimental patterns of hammerstone percussion damage on bones: implications for inferences of carcass processing by humans. *Journal of Archaeological Science* **33**, 459-469.
- Piperno, D. R. 2006. "Phytoliths : a comprehensive guide for archaeologists and paleoecologists". Alta Mira Press, Lanham, MD.
- Piperno, D. R. i Stothert, K. E. 2003. Phytolith evidence for early Holocene Cucurbita domestication in Southwest Ecuador. *Science* **299**, 1054-1057.
- Piperno, D. R., Holst, I., Wessel-Beaver, L. i Andres, T. C. 2002. Evidence for the control of phytolith formation in Cucurbita fruits by the hard rind (Hr) genetic locus: Archaeological and ecological implications. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* **99**, 10923-10928.
- Piperno, D. R., Andres, T. C. i Stothert, K. E. 2000. Phytoliths in Cucurbita and other neotropical curcubitaceae and their occurrence in early archaeological sites from the Lowland American tropics. *Journal of Archaeological Science* **27**, 193-208.
- Piperno, D. R. 1998. Paleoethnobotany in the Neotropics from microfossils: New insights into ancient plant use and agricultural origins in the tropical forest. *Journal of World Prehistory* **12**, 393-449.
- Piperno, D. R. i Pearsall, D. M. 1993a. The Nature and Status of Phytolith Analysis. En "Current Research in Phytolith Analysis: Applications in Archaeology and Paleoecology." (D. M. Pearsall i D. R. Piperno, Eds.), pp. 9-20. MASCA Research Papers in Science and Archaeology. Museum Applied Science Center for Archaeology and The University Museum of Archaeology and Anthropology University of Pennsylvania, Philadelphia.

- Piperno, D. R. i Pearsall, D. M. 1993b. Phytoliths in the Reproductive Structures of Maize and Teosinte - Implications for the Study of Maize Evolution. *Journal of Archaeological Science* **20**, 337-362.
- Piperno, D. R. 1991. The Status of Phytolith Analysis in the American Tropics. *Journal of World Prehistory* **5**, 155-191.
- Piperno, D. R. 1989. The Occurrence of Phytoliths in the Reproductive Structures of Selected Tropical Angiosperms and Their Significance in Tropical Paleoecology, Paleoethnobotany and Systematics. *Review of Palaeobotany and Palynology* **61**, 147-173.
- Piperno, D. R. 1988. "Phytolith Analysis: An Archeological and Geological Perspective." Academic Press, San Diego.
- Piperno, D. R. 1985. Phytolith taphonomy and distributions in archeological sediments from Panama. *Journal of Archaeological Science* **12**, 247-267.
- Pohl, M. E. D., Piperno, D. R., Pope, K. O. i Jones, J. G. 2007. Microfossil evidence for pre-Columbian maize dispersals in the neotropics from San Andres, Tabasco, Mexico. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* **104**, 6870-6875.
- Portillo, M., Albert, R. M. i Henry, D. O. En premsa. Domestic activities and spatial distribution in Ain Abu Nukhayla (Wadi Rum, Southern Jordan): The use of phytoliths and spherulites studies. *Quaternary International*. doi:10.1016/j.quaint.2007.06.002.
- Portillo, M. 2006. "La mòlta i triturat d'aliments vegetals durant la Protohistòria a la Catalunya oriental". Tesi de doctorat, Departament de Prehistòria, Història Antiga i Arqueologia, Universitat de Barcelona.
- Portillo, M., Ball, T. i Manwaring, J. 2006. Morphometric analysis of inflorescence phytoliths produced by *Avena sativa* L. and *Avena strigosa* schreb. *Economic Botany* **60**, 121-129.
- Potts, R. 1988. "Early hominid activities at Olduvai". Aldine de Gruyter, New York.
- Powers, A. H. 1992. Great Expectations: A Short Historical Review of European Phytolith Systematics. En "Phytolith Systematics. Emerging Issues". (J. George Rapp i S. C. Mulholland, Eds.), pp. 15-36. Advances in Archaeological and Museum Science. Plenum Press, New York - London.
- Prasad, V., Stromberg, C. A. E., Alimohammadian, H. i Sahni, A. 2005. Dinosaur coprolites and the early evolution of grasses and grazers. *Science* **310**, 1177-1180.
- Prebble, M. i Shulmeister, J. 2002. An analysis of phytolith assemblages for the quantitative reconstruction of late Quaternary environments of the Lower Taieri Plain, otago, South Island, New Zealand II. Paleoenviromental reconstruction. *Journal of Paleolimnology* **27**, 415-427.

R

- Raban, A. 1998. Mediterranean peoples in transition: thirteenth to early tenth centuries BCE. En "Mediterranean peoples in transition: thirteenth to early tenth centuries BCE". (T. K. Dothan, S. Gitin, A. Mazar i E. Stern, Eds.), pp. 428-438. Israel Exploration Society, Jerusalem.
- Rapp, G. R. i Hill, C. L. 1998. "Geoarchaeology: the earth-science approach to archaeological interpretation". Yale University Press, New Haven.
- Rodríguez, A. 2005. "Conreus i alimentació a la Prehistòria Recent. Paleocarpologia de la Cueva de El Mirador (Sierra de Atapuerca, Burgos)." D.E.A., Departament de Geografia i Història, Universitat Rovira i Virgili.
- Rodríguez, X.-P., Carbonell, E. i Ortega, A. I. 2001. Historique des découvertes préhistoriques de la Sierra de Atapuerca (Burgos, Espagne) et perspectives du futur. *L'Anthropologie* **105**, 3-12.
- Rosas, A., Pérez-González, A., Carbonell, E., van der Made, J., Sánchez, A., Laplana, C., Cuenca-Bescos, G., Pares, J. M. i Huguet, R. 2001. 'Sima del Elefante': A new Pleistocene site at the Sierra de Atapuerca (Spain). *Anthropologie* **105**, 301-312.
- Rosell, J. 2001. "Patrons d'aprofitament de les biomasses animals durant el Pleistocè inferior i mig (Sierra de Atapuerca, Burgos) i Superior (Abric Romaní, Barcelona)". Tesi de doctorat, Àrea de Prehistòria, Departament d'Història i Geografia, Universitat Rovira i Virgili.
- Rosen, A. M. 1997. Phytolith evidence for cereal cultivation at Horvat Galil and Nahal Beset. *Tel Aviv. Journal of the Institute of Archaeology of Tel Aviv University* **24**, 229-236.
- Rosen, A. M. i Weiner, S. 1994. Identifying Ancient Irrigation - a New Method Using Opaline Phytoliths from Emmer Wheat. *Journal of Archaeological Science* **21**, 125-132.
- Rosen, A. M. 1993. Phytolith Evidence for Early Cereal Exploitation in the Levant. En "Current Research in Phytolith Analysis: Applications in Archaeology and Paleoecology". (D. M. Pearsall i D. R. Piperno, Eds.), pp. 160-171. MASCA Research Papers in Science and Archaeology. Museum Applied Science Center for Archaeology and The University Museum of Archaeology and Anthropology University of Pennsylvania, Philadelphia.
- Rosen, A. M. 1989. Microbotanical Evidence for Cereals in Neolithic Levels at Tel Teo and Yiftahel in the Galilee, Israel. *Mitekufat Haeven, Journal of the Israel Prehistoric Society* **22**, 68-77.
- Rovner, I. 2004. On transparent blindfolds - Comments on identifying maize in Neotropical sediments and soils using cob phytoliths. *Journal of Archaeological Science* **31**, 815-819.

Rovner, I. 1971. Potential of Opal Phytoliths for Use in Paleoecological Reconstruction. *Quaternary Research* **1**, 343-359.

Rowlett, R. M. i Pearsall, D. M. 1993. Archaeological Age Determinations Derived From Opal Phytoliths by Thermoluminescence. En "Current Research in Phytolith Analysis: Applications in Archaeology and Paleoecology". (D. M. Pearsall i D. R. Piperno, Eds.), pp. 25-29. MASCA Research Papers in Science and Archaeology. Museum Applied Science Center for Archaeology and The University Museum of Archaeology and Anthropology University of Pennsylvania, Philadelphia.

Runge, F. 1999. The opal phytolith inventory of soils in central Africa - quantities, shapes, classification, and spectra. *Review of Palaeobotany and Palynology* **107**, 23-53.

## S

Sanson, G. D., Kerr, S. A. i Gross, K. A. 2007. Do silica phytoliths really wear mammalian teeth? *Journal of Archaeological Science* **34**, 526-531.

Saxena, A., Prasad, V., Singh, I. B., Chauhan, M. S. i Hasan, R. 2006. On the Holocene record of phytoliths of wild and cultivated rice from Ganga Plain: evidence for rice-based agriculture. *Current Science* **90**, 1547-1552.

Schiegl, S., Stockhammer, P., Scott, C. i Wadley, L. 2004. A mineralogical and phytolith study of the middle stone age hearths in Sibudu Cave, KwaZulu-Natal, South Africa. *South African Journal of Science* **100**, 185-194.

Schiegl, S., Goldberg, P., Pfretzschner, H.-U. i Conard, N. 2003. Paleolithic Burnt Bone Horizons from the Swabian Jura: Distinguishing between *In Situ* Fireplaces and Dumping Areas. *Geoarchaeology-an International Journal* **18**, 541-565.

Schiegl, S., Goldberg, P., Bar-Yosef, O. i Weiner, S. 1996. Ash deposits in Hayonim and Kebara caves, Israel: Macroscopic, microscopic and mineralogical observations, and their archaeological implications. *Journal of Archaeological Science* **23**, 763-781.

Schiegl, S., Lev-Yadun, S., Bar-Yosef, O., Goresy, A. E. i Weiner, S. 1994. Siliceous aggregates from prehistoric wood ash: A major component of sediments in Kebara and Hayonim caves (Israel). *Israel Journal of Earth Sciences* **43**, 267-278.

Schiffer, M. B. 1995. "Behavioral archaeology: first principles." University of Utah Press, Salt Lake City, UT.

Schiffer, M. B. 1987. "Formation processes of the archaeological record". University of New Mexico Press, Albuquerque, NM.

Schiffer, M. B. 1983. Toward the Identification of Formation Processes. *American Antiquity* **48**, 675-706.

- Schiffer, M. B. 1972. Archaeological Context and Systemic Context. *American Antiquity* **37**, 156-165.
- Selvaggio, M. M. 1994. Carnivore Tooth Marks and Stone Tool Butchery Marks on Scavenged Bones - Archaeological Implications. *Journal of Human Evolution* **27**, 215-228.
- Shahack-Gross, R., Albert, R. M., Gilboa, A., Nagar-Hilman, O., Sharon, I. i Weiner, S. 2005. Geoarchaeology in an urban context: the uses of space in a Phoenician monumental building at Tel Dor (Israel). *Journal of Archaeological Science* **32**, 1417-1431.
- Shahack-Gross, R., Berna, F., Karkanas, P. i Weiner, S. 2004a. Bat guano and preservation of archaeological remains in cave sites. *Journal of Archaeological Science* **31**, 1259-1272.
- Shahack-Gross, R., Marshall, F., Ryan, K. i Weiner, S. 2004b. Reconstruction of spatial organization in abandoned Maasai settlements: implications for site structure in the Pastoral Neolithic of East Africa. *Journal of Archaeological Science* **31**, 1395-1411.
- Shahack-Gross, R., Marshall, F. i Weiner, S. 2003. Geo-ethnoarchaeology of pastoral sites: The identification of livestock enclosures in abandoned Maasai settlements. *Journal of Archaeological Science* **30**, 439-459.
- Shahack-Gross, R., Bar-Yosef, O. i Weiner, S. 1997. Black-coloured bones in Hayonim Cave, Israel: Differentiating between burning and oxide staining. *Journal of Archaeological Science* **24**, 439-446.
- Shahack-Gross, R., Shemesh, A., Yakir, D. i Weiner, S. 1996. Oxygen isotopic composition of opaline phytoliths: Potential for terrestrial climatic reconstruction. *Geochimica Et Cosmochimica Acta* **60**, 3949-3953.
- Sobolik, K. D. 1996. Lithic organic residue analysis: An example from the southwestern archaic. *Journal of Field Archaeology* **23**, 461-469.
- Stein, J. K. 2001. A Review of Site Formation Processes and Their Relevance to Geoarchaeology. *En "Earth sciences and archaeology."* (P. Goldberg, V. T. Holliday i C. R. Ferring, Eds.), pp. 37-54. Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York.
- Stern, E. 1998. The Relations Between the Sea Peoples and the Phoenicians in the Twelfth and Eleventh Centuries BCE. *En "Mediterranean peoples in transition: thirteenth to early tenth centuries BCE"*. (T. K. Dothan, S. Gitin, A. Mazar i E. Stern, Eds.), pp. 345-352. Israel Exploration Society, Jerusalem.
- Stiner, M. C., Kuhn, S. L., Surovell, T. A., Goldberg, P., Meignen, L., Weiner, S. i Bar-Yosef, O. 2001. Bone preservation in Hayonim Cave (Israel): A macroscopic and mineralogical study. *Journal of Archaeological Science* **28**, 643-659.
- Stiner, M. C., Goldberg, P., Kuhn, S. L., Meignen, L., Surovell, T. A., Weiner, S. i Bar-Yosef, O. 2000. Long gone or never was? Infrared and macroscopic data on bone diagenesis in Hayonim Cave (Israel). *Journal of Human Evolution* **38**, A29-A30.

Stiner, M. C., Kuhn, S. L., Weiner, S. i Bar-Yosef, O. 1995. Differential Burning, Recrystallization, and Fragmentation of Archaeological Bone. *Journal of Archaeological Science* **22**, 223-237.

Stromberg, C. A. E., Werdelin, L., Friis, E. M. i Sarac, G. 2007. The spread of grass-dominated habitats in Turkey and surrounding areas during the Cenozoic: Phytolith evidence. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology* **250**, 18-49.

Stromberg, C. A. E. 2004. Using phytolith assemblages to reconstruct the origin and spread of grass-dominated habitats in the great plains of North America during the late Eocene to early Miocene. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology* **207**, 239-275.

Stromberg, C. A. E. 2002. The origin and spread of grass-dominated ecosystems in the late Tertiary of North America: preliminary results concerning the evolution of hypsodonty. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology* **177**, 59-75.

## T

Tamrat, E., Thouveny, N., Taieb, M. i Opdyke, N. D. 1995. Revised magnetostratigraphy of the Plio-Pleistocene sedimentary sequence of the Olduvai Formation (Tanzania). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* **114**, 273-283.

Texier, J. P. 2000. À Propos des Processus de Formation des Sites Préhistoriques. *PALEO* **12**, 379-386.

Thorn, V. C. 2004a. Phytolith evidence for C<sub>4</sub>-dominated grassland since the early Holocene at long pocket, northeast Queensland, Australia. *Quaternary Research* **61**, 168-180.

Thorn, V. C. 2004b. Phytoliths from subantarctic Campbell Island: plant production and soil surface spectra. *Review of Palaeobotany and Palynology* **132**, 37-59.

Tsartsidou, G., Lev-Yadun, S., Efstratiou, N. i Weiner, S. 2008. Ethnoarchaeological study of phytolith assemblages from an agro-pastoral village in Northern Greece (Sarakini): development and application of a Phytolith Difference Index. *Journal of Archaeological Science* **35**, 600-613.

Tsartsidou, G., Lev-Yadun, S., Albert, R. M., Miller-Rosen, A., Efstratiou, N. i Weiner, S. 2007. The phytolith archaeological record: strengths and weaknesses evaluated based on a quantitative modern reference collection from Greece. *Journal of Archaeological Science* **34**, 1262-1275.

Twiss, P. C. 1992. Predicted World Distribution of C<sub>3</sub> and C<sub>4</sub> Grass Phytolith. En "Phytolith Systematics. Emerging Issues". (J. George Rapp i S. C. Mulholland, Eds.), pp. 113-128. Advances in Archaeological and Museum Science. Plenum Press, New York - London.

- Twiss, P. C. 1987. Grass-opal phytolith as climatic indicators of the Great Plains Pleistocene. *En "Quaternary environments of Kansas"*. (W. C. Johnson, Ed.), pp. 179-188. Geological Survey, Lawrence.
- Twiss, P. C., Suess, E. i Smith, R. M. 1969. Morphological classification of grass phytoliths. *Soil Science Society of America* **33**, 109-115.

## V

- Vallverdú, J. 2002. "Micromorfología de las facies sedimentarias de la Sierra de Atapuerca y del nivel J del Abric Romaní. Implicaciones geoarqueológicas y paleoetnográficas". Tesi de doctorat, Departament d'Història i Geografia, Universitat Rovira i Virgili.
- Vallverdú, J., Courty, M. A., Carbonell, E., Canals, A. i Burjachs, F. 2001. Homo antecessor sediments of Gran Dolina (Sierra de Atapuerca, Burgos, Spain). Micromorphological interpretation of the formation process and paleoenvironmental record of the sediments. *Anthropologie* **105**, 45-69.
- van der Veen, M. 2007. Formation processes of desiccated and carbonized plant remains - the identification of routine practice. *Journal of Archaeological Science* **34**, 968-990.
- Vaquero, M. i Pastó, I. 2001. The Definition of Spatial Units in Middle Paleolithic Sites: The Hearth-Related Assemblages. *Journal of Archaeological Science* **28**, 1209-1220.
- Vaquero, M. 1999. Intrasite spatial organization of lithic productions in the Middle Palaeolithic: the evidence of the Abric Romaní (Capellades, Spain). *Antiquity* **73**, **281**, 493-504.
- Vaquero, M. 1997. "Tecnología lítica y comportamiento humano: organización de las actividades técnicas y cambio diacrónico en el Paleolítico Medio del Abric Romaní (Capellades, Barcelona)". Tesi de doctorat, Departament d'Història i Geografia, Universitat Rovira i Virgili.
- Vergès, J. M., Allúe, E., Angelucci, D. E., Cebrià, A., Díez, C., Fontanals, M., Manyanós, A., Montero, S., Moral, S., Vaquero, M. i Zaragoza, J. 2002. La Sierra de Atapuerca durante el Holoceno: Datos preliminares sobre las ocupaciones de la Edad del Bronce en la cueva de El Mirador (Ibeas de Juarros, Burgos). *Trabajos de Prehistoria* **59**, 107-126.

## W

- Wallis, L. 2003. An overview of leaf phytolith production patterns in selected northwest Australian flora. *Review of Palaeobotany and Palynology* **125**, 201-248.

- Walter, R. C., Manega, P. C., Hay, R. L., Drake, R. E. i Curtis, G. H. 1991. Laser-Fusion Ar-40/Ar-39 Dating of Bed-I, Olduvai-Gorge, Tanzania. *Nature* **354**, 145-149.
- Waters, M. R. i Kuehn, D. D. 1996. The geoarchaeology of place: The effect of geological processes on the preservation and interpretation of the archaeological record. *American Antiquity* **61**, 483-497.
- Webb, E. A. i Longstaffe, F. J. 2006. Identifying the delta O-18 signature of precipitation in grass cellulose and phytoliths: Refining the paleoclimate model. *Geochimica Et Cosmochimica Acta* **70**, 2417-2426.
- Webb, E. A. i Longstaffe, F. J. 2003. The relationship between phytolith- and plant-water delta O-18 values in grasses. *Geochimica Et Cosmochimica Acta* **67**, 1437-1449.
- Webb, E. A. i Longstaffe, F. J. 2002. Climatic influences on the oxygen isotopic composition of biogenic silica in prairie grass. *Geochimica Et Cosmochimica Acta* **66**, 1891-1904.
- Weinberg, S. 2003. Four golden lessons. *Nature* **426**, 389-389.
- Weiner, S., Goldberg, P. i Bar-Yosef, O. 2002. Three-dimensional distribution of minerals in the sediments of Hayonim Cave, Israel: Diagenetic processes and archaeological implications. *Journal of Archaeological Science* **29**, 1289-1308.
- Weiner, S., Schiegl, S., Goldberg, P. i Bar-Yosef, O. 1995. Mineral Assemblages in Kebara and Hayonim Caves, Israel - Excavation Strategies, Bone Preservation, and Wood Ash Remnants. *Israel Journal of Chemistry* **35**, 143-154.
- Weiner, S., Goldberg, P. i Bar-Yosef, O. 1993. Bone Preservation in Kebara Cave, Israel Using on-Site Fourier-Transform Infrared Spectrometry. *Journal of Archaeological Science* **20**, 613-627.
- Weiner, S. i Bar-Yosef, O. 1990. States of Preservation of Bones from Prehistoric Sites in the near-East - a Survey. *Journal of Archaeological Science* **17**, 187-196.
- Whang, S. S., Kim, K. i Hess, W. M. 1998. Variation of silica bodies in leaf epidermal long cells within and among seventeen species of *Oryza* (Poaceae). *American Journal of Botany* **85**, 461-466.
- Woodward, J. C. i Goldberg, P. 2001. The Sedimentary Records in Mediterranean Rockshelters and Caves: Archives of Environmental Change. *Geoarchaeology-an International Journal* **16**, 327-354.

## Y

- Yellen, J. E. 1977. "Archaeological approaches to the present: models for reconstructing the past". Academic Press, New York.



## Z

- Zhao, Z. J., Pearsall, D. M., Benfer, R. A. i Piperno, D. R. 1998. Distinguishing rice (*Oryza sativa* poaceae) from wild *Oryza* species through phytolith analysis, II: Finalized method. *Economic Botany* **52**, 134-145.
- Zheng, Y. F., Dong, Y. J., Matsui, A., Udatsu, T. i Fujiwara, H. 2003. Molecular genetic basis of determining subspecies of ancient rice using the shape of phytoliths. *Journal of Archaeological Science* **30**, 1215-1221.
- Zucol, A. F., Brea, M. i Scopel, A. 2005. First record of fossil wood and phytolith assemblages of the Late Pleistocene in El Palmar National Park (Argentina). *Journal of South American Earth Sciences* **20**, 33-43.
- Zurro, D., Madella, M., Briz, I. i Vila, A. En premsa. Variability of the phytolith record in fisher-hunter-gatherer sites: An example from the Yamana society (Beagle Channel, Tierra del Fuego, Argentina). *Quaternary International*. doi:10.1016/j.quaint.2007.11.007.