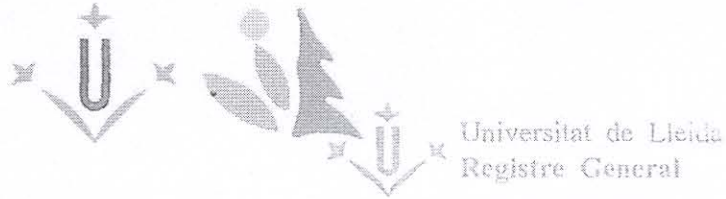


(243) "1995" Piq

UNIVERSITAT DE LLEIDA

ESCOLA TÈCNICA SUPERIOR D'ENGINYERIA AGRÀRIA DE LLEIDA

1600/24642



19 SET. 1995

E: 3898

S:

TESI DOCTORAL



TECNOLOGIA POSTCOLLITA DE L'AVELLANA.

ASSECATGE I FRIGOCONSERVACIÓ DE L'AVELLANA
(*Corylus avellana* L.)

Maria Teresa Piqué Ferré
Juny 1995

010-43360

essent minoritàries les vitamines B₁, B₂ i C (Tous *et al.*, 1987).

L'avellana de les campanyes 90/91, 91/92 i 92/93 procedent de Reus, ha estat caracteritzada mitjançant diferents paràmetres: activitat d'aigua, pH, acidesa total, proteïna, cendres, minerals, composició de la fracció lipídica i activitat enzimàtica. (Taulas 2.1, 2.2, 2.3 i 2.4).

TAULA 2.1. Composició química de l'avellana.

Varietat/ Campanya	NEGRET			PAUETET			TONDA ROMANA	
	90/91	91/92	92/93	90/91	91/92	92/93	90/91	91/92
Activitat d'aigua	0,549	0,521	0,493	0,400	0,648	0,477	0,503	0,601
pH de la suspensió 10%	6,65	6,54	----	6,64	6,58	----	6,57	6,48
Acidesa total (meq/100g)	2,20	3,24	----	2,68	3,99	----	2,66	3,63
Proteïna, N*5,3 (%)	14,8	15,5	----	15,1	16,1	----	15,8	16,2
K (%)	0,577	0,592	----	0,587	0,559	----	0,647	0,585
Ca (%)	0,234	0,282	----	0,218	0,217	----	0,214	0,215
P (%)	0,270	0,290	----	0,300	0,293	----	0,260	0,273
Mg (%)	0,119	0,144	----	0,102	0,140	----	0,140	0,132
Cl (ppm)	870	509	686	720	618	612	870	594
Na (ppm)	139	52,9	36	127	295	68	300	167
Fe (ppm)	25,9	33,3	39,8	25,0	35,1	27,9	22,7	35,4
Cu (ppm)	14,3	15,3	13,5	12,0	14,9	11,1	11,1	13,8
Mn (ppm)	13,2	13,6	16,3	11,5	12,6	11,9	7,3	12,7
Cendres (%)	2,08	2,11	----	2,18	2,20	----	2,12	2,08

TAULA 2.2. Activitat enzimàtica, en Abs/min/mg proteïna.

Varietat/ Campanya	<i>NEGRET</i> 90/91	<i>PAUETET</i> 90/91	<i>TONDA ROMANA</i> 90/91
Esterasa	108	99	143
Lipasa	777	764	401
Peroxidasa	403	419	364
Polifenoloxidasa	563	512	517

TAULA 2.3. Composició i estabilitat de la fracció lipídica extreta per pressió.

Varietat/ Campanya	<i>NEGRET</i>			<i>PAUETET</i>			<i>TONDA ROMANA</i>	
	90/91	91/92	92/93	90/91	91/92	92/93	90/91	91/92
Greix (%)	61,9	66,7	52,0	61	61,5	53,6	57,6	62,5
Índex d'acidesa	0,80	0,15	0,54	0,31	0,15	1,57	0,19	0,10
Índex de peròxids	0	0	----	0	0	----	0	0
Índex K ₂₃₂	1,79	1,11	1,48	1,11	1,16	0,48	1,55	1,34
Índex K ₂₇₀	0,17	0,04	0,29	0,03	0,03	0,10	0,13	0,06
Període d'inducció (h)	5,2	2,8	3,2	4,3	4,5	2,6	3,3	8,1

TAULA 2.4. **Composició quali-quantitativa en àcids grassos.***(Font: Parcerisa et al., 1993)*

Varietat/ Campanya	NEGRET			PAUETET			TONDA ROMANA	
	90/91	91/92	92/93	90/91	91/92	92/93	90/91	91/92
Palmitic C _{16:0} (%)	6,12	5,96	5,59	6,25	6,12	5,99	5,71	7,18
Palmitoleic C _{16:1} (%)	0,25	0,26	0,31	0,31	0,28	0,34	0,20	0,29
Estearic C _{18:0} (%)	1,84	1,85	1,57	1,57	1,66	1,57	1,81	2,02
Oleic C _{18:1} (%)	76,55	73,62	71,85	73,96	74,25	73,67	76,15	80,41
Linoleic C _{18:2} (%)	15,07	18,01	20,39	17,62	17,43	18,10	15,98	9,95
Linolènic C _{18:3} (%)	0,16	0,07	0,10	0,12	0,10	0,14	0,14	----
Eicosenoic C _{20:1} (%)	0,19	0,22	0,19	0,17	0,14	0,18	0,14	0,15

2.3. DETERMINACIÓ DEL COMPORTAMENT HIGROSCÒPIC DE L'AVELLANA

2.3.1. Rehidratació

2.3.1.1. Material

Per a determinar el comportament de l'avellana davant el procés de rehidratació s'ha emprat avellana de la varietat *Negret*, que ha estat assecada a nivell industrial fins a un 4-5 % d'humitat (b.s.), l'avellana en gra, i fins a un 8-9% d'humitat (b.s.), l'avellana en closca.

2.3.1.2. Mètode experimental

La metodologia utilitzada ha estat la següent: s'ha realitzat una immersió en aigua de les mostres d'avellana, tant en closca com en gra, en banys termostatats a temperatures de 15°C, 20°C i 35°C. Als temps de 0, 15, 30, 40, 50, 60, 90, 120, 150, 180 i 195 minuts s'han extret mostres de 15 g aproximadament i, després d'assecar l'aigua superficial amb paper de filtre, s'ha determinat la humitat en estufa de buit segons el mètode que es descriu a l'apartat 2.6.1.

2.3.2. Humitats d'equilibri

2.3.2.1. Material

En el procés d'adsorció a 10°C s'ha utilitzat avellana en gra de la varietat *Negret* assecada en estufa de buit -a 70°C i menys de 100 mm c.d.Hg- fins a pes constant. En la determinació de les isoterms de sorció a 3°C, 10°C i 30°C, s'ha emprat avellana en gra de les varietats *Negret*, *Pauletet* i *Tonda Romana* amb un 3% d'humitat inicial (b.s.). Finalment, pel procés de

desorció a 30°C, 40°C, 60°C i 80°C, l'avellana en gra i en closca, de les varietats *Negret* i *Pauletet*, ha estat hidratada fins a una humitat del 20% (b.s.); el temps de remull s'ha calculat mitjançant el model de Peleg (1988) aplicat a l'avellana.

2.3.2.2. Instal·lació experimental

La instal·lació experimental ha estat constituïda per tres jocs de deu flascons de vidre, amb tapes "twist-off" que asseguren un tancament hermètic. En el centre de cadascuna de les tapes s'ha fet un orifici circular que s'obtura perfectament amb un ganxo de ferro subjectat, per sobre i per sota de la tapa, amb una arandella i una femella; per aconseguir una millor hermeticitat, s'ha aplicat silicona a les juntures. De cada ganxo s'ha fet penjar una cistella feta amb filferro d'acer inoxidable, on s'ha col·locat un pes substàncies amb la mostra d'avellana. Els flascons contenen diferents solucions aquoses d'àcid sulfúric amb les que s'aconsegueixen diferents humitats relatives de l'aire en contacte amb el producte. Per a evitar una corrosió del ganxo, aquest s'ha recobert amb paper d'alumini. (Figura 2.2).

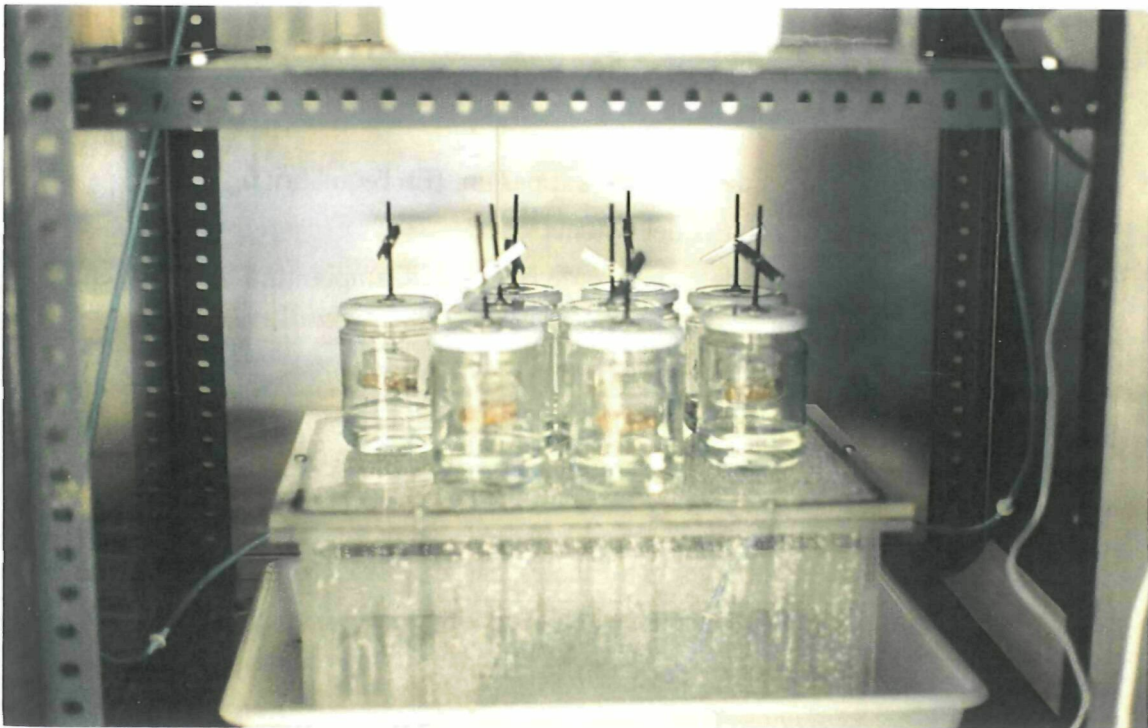


FIGURA 2.2. Instal·lació experimental per a la determinació d'humitats d'equilibri.

Les temperatures d'experimentació es mantenen constants utilitzant els armaris frigorífics a 3°C i 10°C de la planta pilot de frigoconservació i una estufa termostatada a 30°C, 40°C, 60°C i 80°C. La instal·lació es completa amb una balança analítica Salter AND model ER-120A amb precisió de 0,1 mg.

2.3.2.3. Mètode experimental

La determinació de les isoterms d'humitat d'equilibri s'ha fet pel mètode gravimètric estàtic. Consisteix en posar el producte en contacte amb aire d'humitat relativa coneguda dins d'un recinte tancat, mantenint constant la temperatura del sistema (Troller i Christian, 1978; Iglesias i Chirife, 1982).

Les diferents humitats relatives s'han aconseguit amb dissolucions aquoses d'àcid sulfúric. La humitat relativa de l'aire en contacte amb una dissolució aquosa d'àcid sulfúric és funció de la temperatura i de la concentració de la dissolució, i es pot calcular amb l'expressió (Molnár, 1987):

$$\log \psi = \left[a_1 - \frac{a_2}{T} \right] + \log \frac{133,3224}{p_v^o} \quad (2.1)$$

on Ψ = humitat relativa de l'aire, en tant per un. (En l'equilibri: $a_w = \Psi$)

T = temperatura absoluta del sistema.

p_v^o = pressió de vapor de saturació de l'aigua a la temperatura del sòlid, en Pa.

3°C → 757 Pa 40°C → 7.375 Pa

10°C → 1.227 Pa 60°C → 19.917 Pa

30°C → 4.241 Pa 80°C → 47.356 Pa

a_1 i a_2 = constants. Venen donades segons la concentració de H_2SO_4 (Molnár, 1987):

C(%)	a_1	a_2	C(%)	a_1	a_2
10	8,925	2.259	60	8,841	2.457
20	8,922	2.268	70	9,032	2.688
30	8,864	2.271	80	9,293	3.040
40	8,840	2.299	90	9,265	3.390
50	8,832	2.357	95	9,790	3.888

Substituint els valors de les constants en l'equació 2.1, s'han obtingut les corbes que representen la humitat relativa de l'aire en equilibri amb la dissolució d'àcid sulfúric en funció de la concentració -en % en pes d'àcid sulfúric pur- i de la temperatura (Figura 2.3).

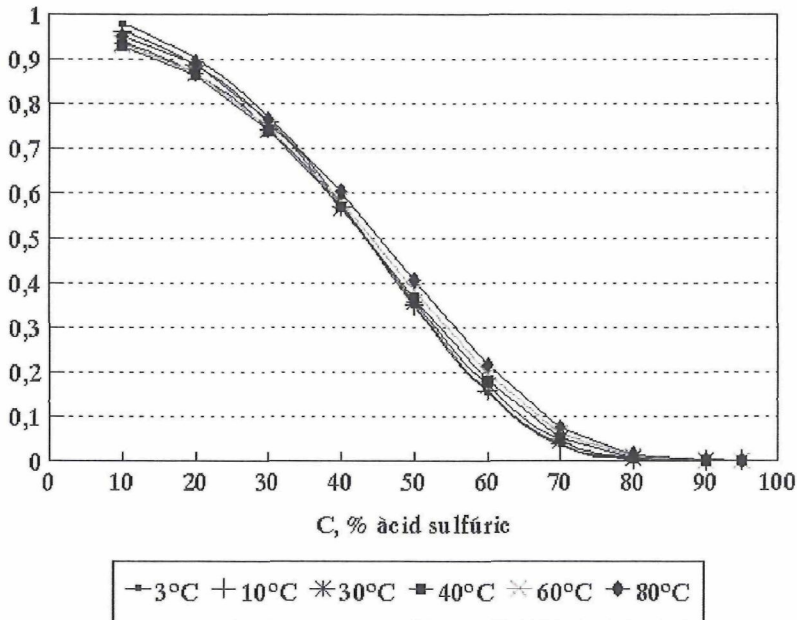


FIGURA 2.3. Corbes d'equilibri: humitat relativa de l'aire en funció de la concentració d'àcid sulfúric.

A partir d'aquestes corbes, s'han seleccionat les concentracions (% en pes) d'àcid sulfúric que permeten aconseguir uns valors de la humitat relativa de l'aire representatius en l'interval complet 0-100%. Les concentracions que s'han escollit són: 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 63%, 66%, 70% i 72%. Es preparen les dissolucions i s'introdueixen en els flascons, que han estat numerats per a la seva identificació.

Les mostres d'avellana, d'uns 4 grams, s'esmicolen i es col·loquen dins dels pesasubstàncies previament tarats, els quals s'introdueixen tot seguit en els flascons. Després de tancar-los hermèticament, els flascons es posen en les cambres a temperatura controlada o a l'estufa termostatada, i periòdicament es pesen els pesasubstàncies amb les mostres. Quan el pes es manté constant, es dona per acabada l'experiència i es determina la humitat de la mostra seguint el mètode que es descriu a l'apartat 2.6.1; aquesta humitat del producte es considera que és la humitat d'equilibri.

En finalitzar cada experiència, la humitat relativa ambient es torna a calcular per a cada flascó. Això es fa determinant la concentració de la dissolució per valoració amb hidròxid sòdic 5N i indicador fenolftaleïna, i utilitzant l'equació 2.1. Cal fer aquesta correcció a causa dels errors de preparació i a l'adsorció d'humitat ambient per part del producte.

2.4. DISSENY DE LES PLANTES PILOT DE FRIGOCONSERVACIÓ I ASSECATGE

2.4.1. Disseny de la planta pilot de frigoconservació

2.4.1.1. Disseny de les instal·lacions

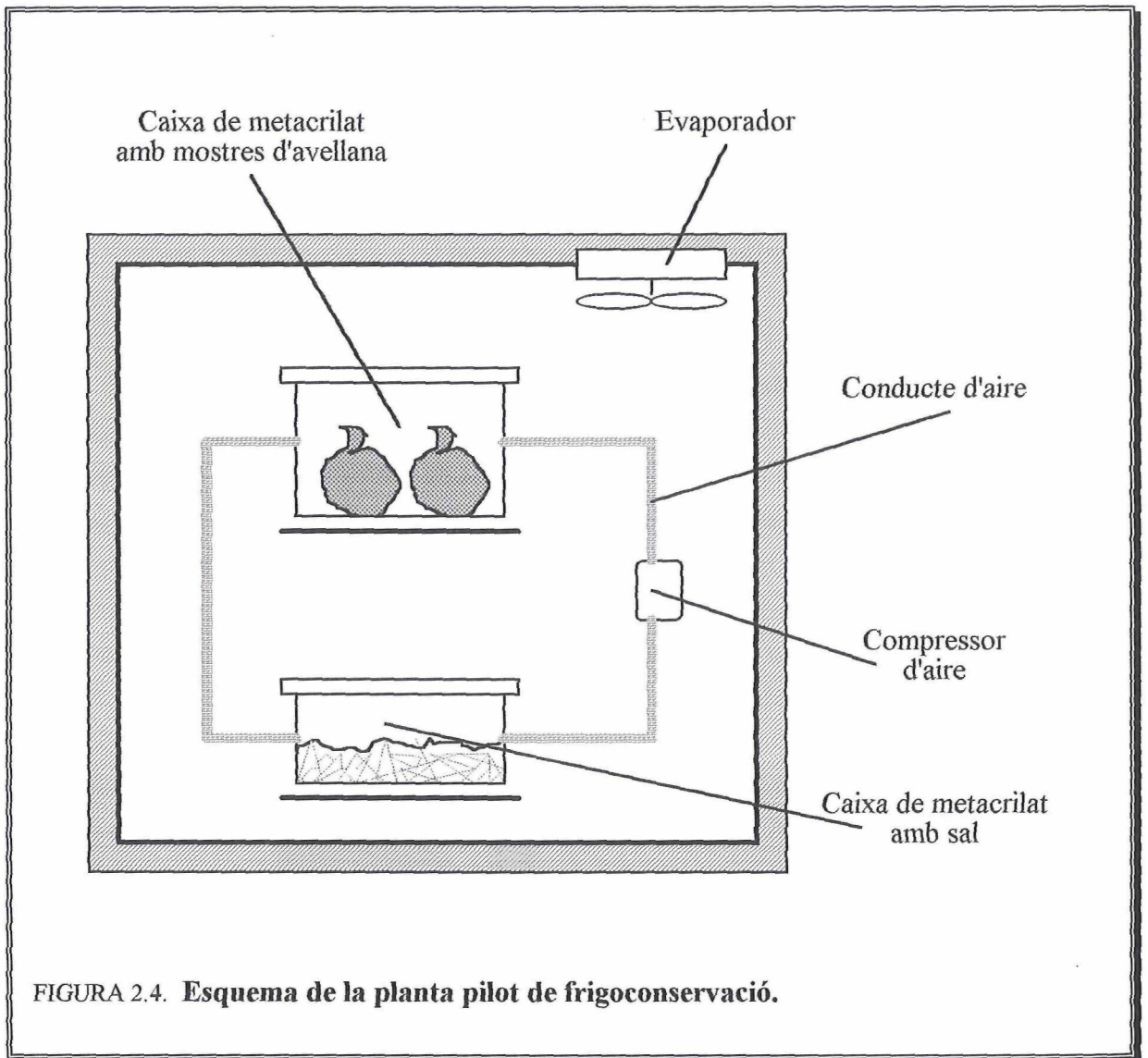
L'estudi de la influència de les condicions d'emmagatzematge refrigerat sobre la qualitat final de l'avellana en gra s'ha realitzat a nivell de planta pilot, a les instal·lacions del Departament de Tecnologia d'Aliments de l'E.T.S.E.A. de Lleida. Amb aquest estudi de simulació física es vol aconseguir una millor informació al voltant de les dades de disseny, per a determinar les condicions de frigoconservació més adequades des del punt de vista econòmic (minimització de costos) i de qualitat del producte.

L'adequat disseny de la planta pilot és fonamental per a obtenir un resultat satisfactori del programa d'experimentació. Una vegada establerta l'estratègia d'experimentació en planta pilot -apartat 2.1.2.2.-, es va procedir a dissenyar pròpiament la planta pilot segons López (1990).

El tamany mínim de la planta pilot es va calcular tenint en compte la quantitat mínima de producte necessària per a realitzar les determinacions analítiques. Aquestes determinacions es fan cada 3 mesos i s'empren prop de 500 g de mostra; com la humitat de l'avellana es determina mensualment, cal utilitzar uns 3 kg d'avellana per a cada experiència.

Els diferents nivells d'humitat relativa s'han aconseguit posant l'aire en contacte amb solucions sobresaturades de sals. S'han utilitzat clorur càlcic hidratat i nitrat càlcic hidratat per aconseguir humitats relatives de l'aire de 40% i 60% respectivament (Molnár, 1987).

Les mostres de 3 kg, una de cada varietat, s'han introduït en caixes estanques de metacrilat de $0,4 \times 0,4 \times 0,5 \text{ m}^3$, les quals estaven connectades en circuit tancat amb caixes estanques de metacrilat amb sal i de dimensions $0,25 \times 0,4 \times 0,4 \text{ m}^3$, de tal manera que s'aconseguien en equilibri amb la sal i de forma dinàmica -mitjançant un compressor d'aire de petita capacitat- humitats relatives de l'aire que envolta les avellanes, de l'ordre de 40% -amb $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ - i 60% -amb $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ - (Figura 2.4).



Les caixes van allotjades en dos armaris frigorífics iguals, amb dos compartiments iguals cadascun, on es mantenen constants els diferents nivells de temperatura (0°C , 3°C , 7°C i 10°C). Els armaris frigorífics tenen en el seu interior una sonda que mesura la temperatura i la humitat de l'aire de la cambra; quan la temperatura en l'interior de la cambra supera el diferencial ($\pm 0,2^{\circ}\text{C}$) fixat al termostat, aquest actua accionant el sistema frigorífic de cada armari frigorífic, que es compon de:

- 1 unitat condensadora, model CAJ 4510T-alta temperatura, L'UNITE HERMETIQUE-HP-3/4; situada externament.

- 2 evaporadors d'aire de convecció forçada, model PAR 960, amb salt tèrmic de 10°C; situat cadascun al sostre de cada compartiment de l'armari.
- 2 vàlvules d'expansió termostàtiques FLICA TW-2.
- 2 solenoïdes de líquid DANFOSS.
- 1 mirilla anti-humitat.
- 1 filtre deshidratador.
- 1 presostat combinat alta i baixa tensió DANFOSS.
- Canonades per a la unió hermètica dels components del sistema frigorífic.
- Càrrega de freó R-22.

2.4.1.2. Calibrat de la planta pilot

En la planta pilot, la temperatura es regula mitjançant els termostats. El control de la temperatura es fa observant diàriament si el valor que apareix en el quadre de comandaments es correspon amb el valor fixat.

El valor de la humitat relativa que apareix en el quadre de comandaments no és la de l'aire en contacte amb les avellanes, sinó que correspon a l'aire exterior a les caixes, havent-se dissenyat la instal·lació frigorífica per a que aquesta humitat relativa no sigui superior al 65%.

La humitat relativa de l'aire de l'interior de les caixes es controla periòdicament amb un higròmetre de la marca VAISALA que consta d'una sonda de HR i temperatura model HMP 125B, amb indicador digital serie SV. Per a determinar la humitat relativa, es col·loca l'higròmetre en circuit tancat amb la caixa que conté la sal i la que conté les avellanes, procurant que la sonda entri a una humitat pròxima a la que teòricament s'ha de detectar; s'agafa el valor mínim marcat pel higròmetre (Figura 2.5).

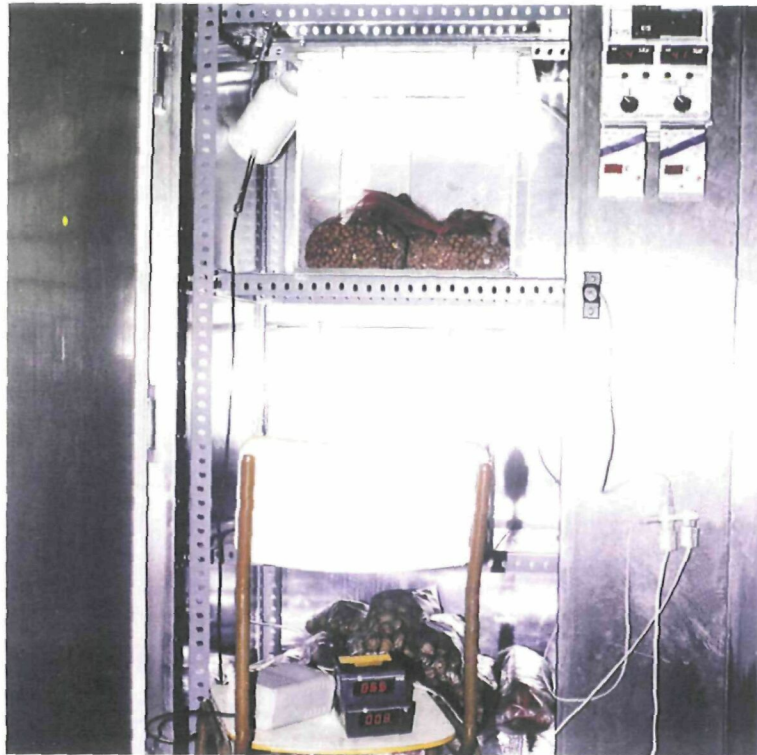


FIGURA 2.5. Determinació periòdica de la humitat relativa dins les caixes.

2.4.2. Disseny de la planta pilot d'assecatge

Les experiències d'assecat en capa prima i els estudis de la influència de la temperatura d'assecat sobre la qualitat de l'avellana s'han realitzat en una planta pilot d'assecat del Departament de Tecnologia d'Aliments de l'Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Agrària de Lleida.

La instal·lació d'assecat consta de (Figura 2.6):

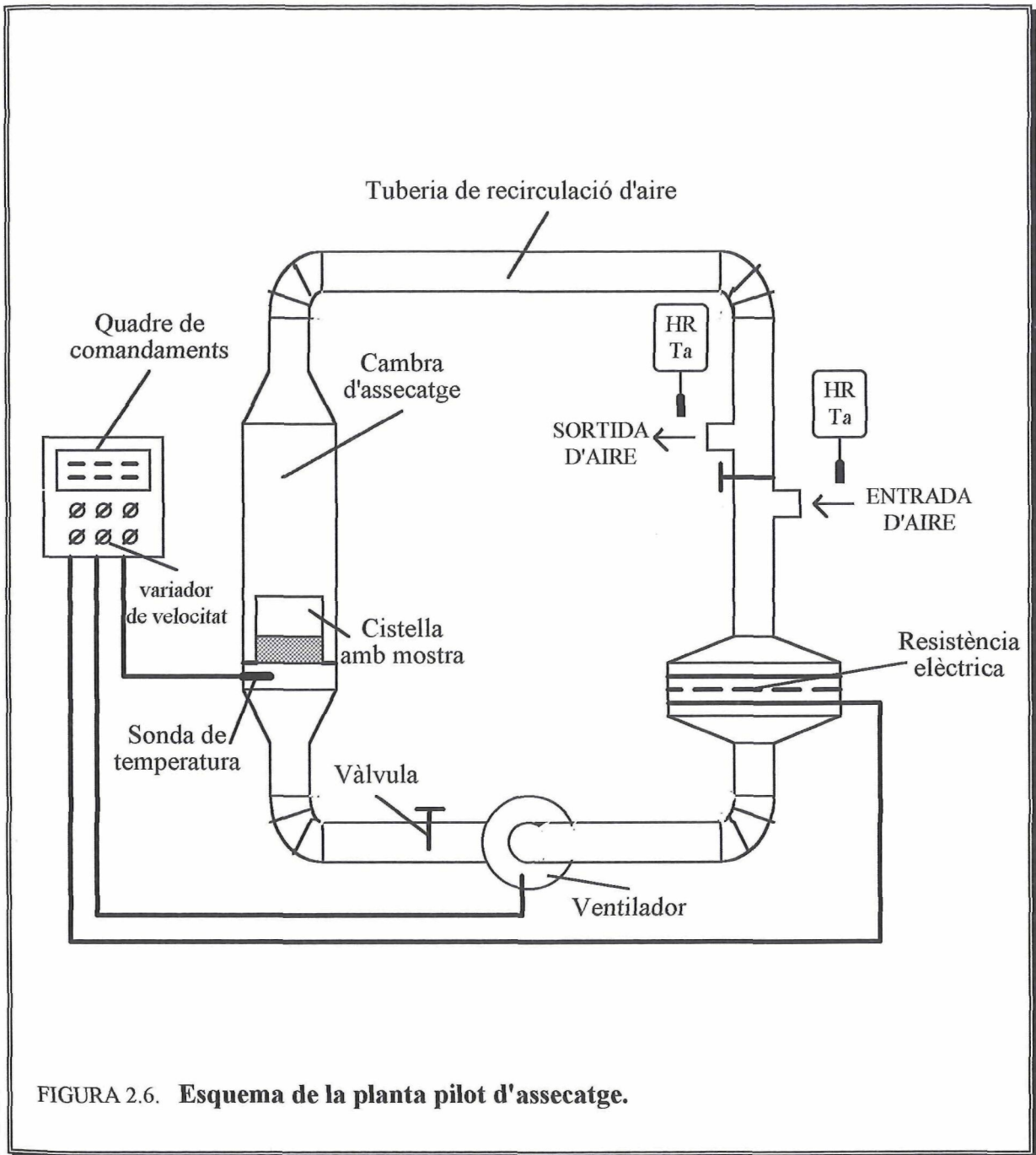


FIGURA 2.6. Esquema de la planta pilot d'assecatge.

- Cistella cilíndrica d'acer inoxidable, de 0,17 m de diàmetre, que és on s'introdueix la mostra.
- Ventilador model MA 26 M 2H de CASALS® de 0,5 CV, connectat al sistema de variació de velocitat.
- Resistència elèctrica de 8 kW, per a escalfar l'aire fins a la temperatura desitjada.

- Quadre de comandaments, amb termostat Eliwell de control de la temperatura de l'aire calent que entra a la cistella, i amb variador de la velocitat del motor del ventilador.
- Vàlvules de comporta, per a regular la velocitat de l'aire que entra a la cistella.
- Control de la humitat relativa de l'aire a l'entrada i a la sortida del llit d'assecat mitjançant higròmetre marca VAISALA amb sonda model HMP 125B, amb indicador digital de temperatura i d'humitat relativa.
- Control de la velocitat de l'aire mitjançant anemòmetre de turbina model WM-DA 4000.

L'assecat s'ha fet sense recirculació de l'aire. La mostra que es desitja assecar s'ha posat dins de la cistella i s'ha fet passar aire calent a través d'ella. Cada 10 minuts s'ha mesurat la pèrdua d'humitat de l'avellana pesant la cistella amb la mostra en una balança QUARTZ-3 Medium de 400x400 mm, amb indicador digital i amb escala de $15 \text{ kg} \pm 1 \text{ g}$; l'assecat s'ha donat per finalitzat quan s'ha assolit un pes constant.

La determinació del contingut d'humitat (b.s.) de la mostra durant l'assecat s'ha fet a partir del contingut d'humitat (b.h.) de l'avellana abans i després d'assecar, determinant la matèria seca de la mostra. El càlcul que s'ha seguit és:

$$W_s = \frac{W_o \cdot [1 - X_{ho}] + W_f \cdot [1 - X_{hf}]}{2} \quad (2.2)$$

$$X = \frac{[W - W_s]}{W_s} \quad (2.3)$$

- on
- X = humitat de l'avellana en cada instant, en b.s.
 - X_{ho} = humitat de l'avellana abans d'assecar, en b.h.
 - X_{hf} = humitat de l'avellana després d'assecar, en b.h.
 - W = pes de la mostra d'avellana en cada instant, en kg.
 - W_s = pes de la matèria seca de la mostra d'avellana, en kg.
 - W_o = pes de la mostra d'avellana abans d'assecar, en kg.
 - W_f = pes de la mostra d'avellana després d'assecar, en kg.

2.5. ESTUDIS DE SIMULACIÓ DEL PROCÉS D'ASSECATGE DE L'AVELLANA EN LLIT PROFUND

La simulació és una eina que s'està utilitzant cada cop més en el disseny, optimització i control dels processos industrials. El nucli de tot simulador és el model matemàtic, que està format per les equacions que representen els fenòmens físics i químics que tenen lloc, i els algorismes necessaris per a resoldre aquestes equacions (Rodríguez *et al.*, 1990).

En la modelització de l'assecat d'avellana en llit profund s'han considerat diferents models matemàtics que resolen les equacions de velocitat d'assecat, i que ja s'han exposat en l'apartat 1.4.2.2:

- Equació de difusió efectiva, juntament amb l'equació de velocitat d'assecat constant (Rizvi, 1986; Okos *et al.*, 1992)
- Equació de Page (1949)
- Equació de Puiggali (1987)

i s'han considerat també diferents models que resolen el balanç de calor i l'equació de velocitat de transferència de calor en la capa elemental:

- Model de Nellist (1974)
- Model de Puiggali (1987)

Després d'ajustar les dades experimentals de l'assecat en capa prima a les equacions de velocitat d'assecat, s'ha observat que l'equació de Puiggali no dona un bon ajust i que l'equació de Page s'ajusta millor que l'equació de difusió; per això, en la realització del programa de simulació s'ha utilitzat solament el model de Nellist, emprant com a equació de velocitat d'assecat l'equació de Page.

El mètode de simulació considera una capa elemental de llit d'assecat d'espessor δz i una secció d'àrea unitària amb un contingut mig d'humitat de l'avellana X i una temperatura T_p . L'aire creua la capa elemental amb una temperatura T_a , un contingut d'aigua w_a , i un cabal màssic G_a . Hi ha quatre variables dins del sistema (T_p , X , T_a i w_a), per tant cal almenys quatre equacions per a la seva resolució.

2.5.1. Model d'assecat en llit profund

El model plantejat per Nellist (1974) consisteix en quatre equacions diferencials parcials. Per a resoldre el sistema d'equacions resultant dels balanços d'humitat i calor, de la equació de velocitat de transferència de calor i de la velocitat d'assecat en la capa elemental s'estableixen una sèrie de supostos per a simplificar el model:

- La circulació de l'aire és unidireccional.
- L'avellana es considera un producte de forma esfèrica i homogeni, sense gradients de temperatura interns.
- La pèrdua de calor per conducció dins del llit d'assecat és despreciable.
- El procés és adiabàtic, no hi ha pèrdua ni guany de calor a través de les parets de l'assegador.
- La contribució de les derivades parcials de la temperatura i del contingut d'aigua de l'aire respecte al temps és despreciable.
- El cabal màssic de l'aire que circula a través del producte és constant.
- Les calors específiques de l'aigua (C_w), vapor (C_v) i aire (C_a) són constants.
- La densitat (ρ_a), calor específica, humitat absoluta i temperatura de l'aire són constants en cada capa elemental durant l'interval de temps δt .
- La densitat (ρ_p), calor específica (C_p), humitat i temperatura de l'avellana són constants en cada capa elemental durant l'interval de temps δt .
- La calor latent de vaporització de l'aigua en l'avellana (L_p) depen del contingut d'humitat de la mateixa.
- La temperatura de l'avellana en cada interval de temps és el valor mig entre la temperatura de l'avellana a l'interval anterior i la temperatura de l'aire que entra en la capa considerada.

El model de Nellist en forma de diferències finites és:

Equació del balanç d'humitat

{Aigua perduda pel producte} = {Aigua guanyada per l'aire}

$$\rho_p \cdot \left[\frac{-\Delta X}{\Delta t} \right] = G_a \cdot \left[\frac{\Delta w_a}{\Delta z} \right] \quad (2.4)$$

és a dir:

$$\Delta w_a = -\rho_p \cdot \frac{\Delta z}{G_a} \cdot \left[\frac{\Delta X}{\Delta t} \right] \quad (2.5)$$

Equació del balanç de calor

{Canvi d'entalpia de l'aire} = {Canvi d'entalpia del producte}

El canvi d'entalpia de l'aire és:

$$G_a \cdot \Delta t \cdot \left[C_a \cdot T_a + C_v \cdot w_a \cdot T_a + L_a \cdot w_a \right] - \left[C_a \cdot [T_a + \Delta T_a] + C_v \cdot [w_a + \Delta w_a] \cdot [T_a + \Delta T_a] + L_a \cdot [w_a + \Delta w_a] \right] \quad (2.6)$$

El canvi d'entalpia del producte és:

$$\rho_p \cdot \Delta z \cdot \left[T_p \cdot [C_p + C_w \cdot X] - [T_p + \Delta T_p] \cdot [C_p + C_w \cdot [X + \Delta X]] \right] \quad (2.7)$$

Substituint l'equació 2.5 en l'equació 2.6 i igualant les equacions 2.6 i 2.7, el valor de la variació de la temperatura de l'aire en la capa elemental resulta igual a:

$$\Delta T_a = \frac{\frac{\rho_p \cdot \Delta z}{G_a \cdot \Delta t} \cdot \left[\Delta X \cdot [C_v \cdot T_a + L_a - C_w \cdot T_p] - \Delta T_p \cdot [C_a + C_w \cdot [X + \Delta X]] \right]}{C_a + C_v \cdot \left[w_a - \rho_p \cdot \frac{\Delta z}{G_a} \cdot \frac{\Delta X}{\Delta t} \right]} \quad (2.8)$$

Equació de transferència de calor

{Calor transferida entre l'aire i el producte} = {Canvi en la calor sensible del producte} +
{(entalpia de l'aigua evaporada - entalpia de l'aigua abans d'evaporar-se)}

La calor transferida entre l'aire i el producte és:

$$h_{cv} \cdot \Delta z \cdot \left[\left[T_a + \frac{1}{2} \cdot \Delta T_a \right] - \left[T_p + \frac{1}{2} \cdot \Delta T_p \right] \right] \cdot \Delta t \quad (2.9)$$

La variació de calor sensible del producte és:

$$\rho_p \cdot \Delta z \cdot \Delta T_p \cdot [C_p + C_w \cdot X] \quad (2.10)$$

La variació de l'entalpia de l'aigua evaporada en l'interval i capa considerada és:

$$\rho_p \cdot \Delta z \cdot [-\Delta X] \cdot [L_p + C_v \cdot T_a - C_w \cdot T_p] \quad (2.11)$$

Així la variació de la temperatura del producte vé donada per l'expressió:

$$\Delta T_p = \frac{A + \rho_p \cdot \frac{\Delta X}{\Delta t} \cdot \left[\frac{2 \cdot Y}{h_{cv}} + \frac{\Delta z}{G_a \cdot E} \cdot F \right]}{1 + \frac{\rho_p}{\Delta t} \cdot \left[\frac{2 \cdot B}{h_{cv}} + \frac{\Delta z}{G_a \cdot E} \cdot [B + C_w \cdot \Delta X] \right]} \quad (2.12)$$

on $A = 2 \cdot [T_a - T_p]$

$$B = C_p + C_w \cdot X$$

$$E = C_a + C_v \cdot \left[w_a \cdot \frac{\rho_p \cdot \Delta z}{G_a} \cdot \frac{\Delta X}{\Delta t} \right]$$

$$F = C_v \cdot T_a + L_a - C_w \cdot T_p$$

$$Y = L_p + C_v \cdot T_a - C_w \cdot T_p$$

Equació de la velocitat d'assecat

L'equació considerada és la de Page, que es pot escriure com:

$$\ln \left[\frac{X - X_e}{X_o - X_e} \right] = -k \cdot t^u \quad (2.13)$$