

PERDIDA DE PESO Y TIEMPO MAXIMO
DE ALMACENAMIENTO DE LAS VARIETADES
DE PAPA PURACE Y CAPIRO

Por:

Luis Gabriel Villa Villegas*

RESUMEN

El presente trabajo de investigación tuvo como objetivo el estudio del comportamiento de dos variedades de papa colombianas: Puracé y Capiro, en relación a la pérdida de peso en almacenamiento. Se estudió tanto el problema "inverso" de la determinación de los parámetros que caracterizan el comportamiento individual del producto, como la predicción de pérdida de peso y tiempo máximo de almacenamiento de dichas variedades.

Se utilizó un modelo desarrollado por Villa (1973), el cual se basó en el comportamiento diferencial de las distintas regiones de la corteza de un producto. "Superficies libres", membranas porosas y regiones impermeables son identificadas en el modelo como los componentes de la corteza.

Para utilizar el modelo fue necesario determinar el área superficial de partículas individuales del producto. Se obtuvieron relaciones de peso-área superficial para cada una de las variedades estudiadas.

El modelo matemático pudo simplificarse debido a que, al analizar los resultados, las áreas de la corteza de estas variedades que se comportan como "superficie libre" mostraron ser de naturaleza despreciable en relación con la pérdida de peso.

Utilizando el modelo simplificado, y en base a experimentos de pérdida de peso a diferentes condiciones de almacenamiento, se obtuvieron los parámetros que caracterizan el comportamiento de cada una de estas variedades. Se encontró que la corteza de las variedades Puracé y Capiro

* Ph. D. Profesor del Departamento de Tecnología Agrícola.

son impermeables al paso del vapor de agua en 95,7 y 99,0%, respectivamente. Se encontró que el parámetro $r\delta$, que define la "resistividad" de zonas que se comportan como membrana porosas, es función del déficit de presión de vapor en las dos variedades estudiadas. Relaciones lineales entre $r\delta$ y el déficit de presión de vapor para cada variedad fueron obtenidas.

Una vez determinados los parámetros, se desarrollaron gráficos de predicción de pérdidas de peso y tiempo de almacenamiento a diferentes condiciones. El efecto de cada variable puede estudiarse por medio de tales gráficos. Se pueden analizar igualmente las posibilidades y limitaciones del uso del aire ambiental como elemento acondicionador en las zonas de producción. Estos análisis permiten el desarrollo de sistemas económicos para mantener el producto en buenas condiciones.

SIMBOLOS

- A = Area superficial pies².
- D_{wa} = Difusividad molecular, pies²/hr.
- h_d = Coeficiente promedio de transferencia de masa por convección, pie/hr.
- M = Peso molecular del agua (=18,01).
- \dot{M}_w = Caudal de flujo de masa total, lbm/hr.
- \dot{M}_{w1} = Fracción del caudal de flujo total que ocurre a través de regiones que se comportan como "superficies libres", lbm/hr.
- \dot{M}_{w2} = Fracción del caudal del flujo total que ocurre a través de regiones que se comportan como membranas porosas, lbm/hr.
- \dot{M}_{w3} = Flujo de masa a través de zonas impermeables (=0).
- P_o = Presión de vapor en la parte exterior de una superficie comportándose como membrana porosa, lbf/pie².
- P_s = Presión de vapor en la parte interior de una superficie comportándose como membrana porosa, lbf/pie².
- P_{ws} = Presión de vapor en la superficie del producto, lbf/pie².
- P_{w∞} = Presión de vapor del medio circundante, lbf/pie².
- r = Parámetro que representa la "resistividad" de una membrana al paso del vapor de agua, sin dimensiones.
- $r\delta$ = Parámetro de la corteza (=resistividad, r, por el espesor de la membrana δ), pies.
- Re = Número de Reynolds, ($= \frac{V_\infty X}{\sqrt{\quad}}$), sin dimensiones.
- R_o = Constante universal de los gases ($= 1544 \frac{\text{Pie-lb}}{\text{mole-oR}}$)

- Sh = Número de Sherwood ($= \frac{h_d x}{D_{wa}}$)
- T = Temperatura, °R ó °F.
- VPD = Déficit de presión de vapor, lbf/pie².
- V_∞ = Velocidad del medio circundante, pie/hr.
- W₀ = Peso de una partícula individual, libras.
- X = Dimensión característica de un cuerpo, pies.
- γ₁ = Parámetro de un modelo dado.
Fracción del área superficial de un producto que se comporta como una superficie libre, decimal.
- γ₂ = Fracción del área superficial de un producto que se comporta como una membrana porosa, decimal.
- δ = Espesor de una membrana, pies.
- √ = Viscosidad cinemática del aire, ft²/hr.

I. INTRODUCCION

La pérdida de peso es uno de los factores de diseño importantes en el almacenamiento de papa, el cual determina a su vez el tiempo máximo de almacenamiento a unas condiciones dadas. Tales pérdidas no sólo desmejoran la calidad del producto sino que constituyen pérdidas económicas directas.

Como uno de los factores que determinan la pérdida de peso es la naturaleza de la corteza del producto, en relación a su capacidad para impedir el paso del agua hacia el medio circundante, cada variedad se comporta en forma diferencial. Por ello, para la determinación de las pérdidas es necesario obtener la información básica sobre el comportamiento de la variedad respectiva.

Una vez obtenida la información necesaria, es posible predecir las pérdidas para las condiciones del almacenamiento dadas, lo mismo que el tiempo máximo que el producto puede conservarse antes de perder un porcentaje de peso dado.

El conocimiento de la respuesta de las variedades de papa cultivadas en Colombia al medio en el cual son almacenadas es especialmente importante, pues permitiría el desarrollo de sistemas económicos para mantener el producto en buenas condiciones. Las características físicas de temperatura y humedad de las zonas en las cuales se cultiva la papa en el país, permiten la utilización del aire ambiental como medio refrigerante, reduciéndose los costos de almacenamiento en forma notable. En el diseño de las bodegas de almacenamiento para tal situación, es necesario determinar las limitaciones originadas por la pérdida de peso al utilizar aire ambiental como medio para conservar el producto.

En el presente trabajo de investigación se buscó determinar el comportamiento de dos variedades de papas de importancia económica en el país en relación con la pérdida de peso. Se estudió tanto el problema "in-

verso" de la determinación de los parámetros que caracterizan el comportamiento individual del producto, como la predicción de pérdidas de peso y tiempo máximo de almacenamiento de las variedades estudiadas.

Se aspira a que la metodología utilizada sirva de base para futuros estudios sobre la respuesta ambiental no sólo de otras variedades de papa sino de frutas y hortalizas tropicales sobre las cuales existe un conocimiento muy limitado.

II. REVISION DE LITERATURA

2.1 *El Proceso de la Pérdida de Peso:*

La investigación del proceso de transferencia de masa de un cuerpo húmedo puede dividirse para efectos de su análisis en dos partes: 1) el proceso de transferencia ocurrido dentro del producto y 2) la interacción de la superficie del producto con el medio circundante. El primero de tales procesos ocurre como resultado del flujo capilar y difusión causada por una diferencia en concentración.

Por otra parte, los factores que controlan la velocidad de transferencia de vapor de agua del cuerpo húmedo hacia el ambiente que lo rodea están asociados con la convección del agua evaporada desde la superficie del cuerpo. Van Arsdel (1963) estableció que los factores que determinan la velocidad del agua dentro del producto pueden considerarse como factores independientes de las condiciones externas.

El fenómeno de la pérdida de peso de productos agrícolas perecederas en almacenamiento, puede analizarse a un nivel macroscópico como un proceso controlado por la velocidad a la cual la humedad se mueve dentro del producto y es arrastrada de la superficie por convección. Fockens (1967).

La velocidad a la cual la humedad es removida de la superficie del producto hacia el medio circundante depende tanto de factores externos (humedad, temperatura y velocidad del aire), como de la naturaleza del producto (forma, tamaño y características de la corteza protectora). Gac (1956), Burg y Burg (1965), Fockens (1967), Lutz (1968) Butchbaker (1970).

Villa (1973) desarrolló un modelo matemático, en el cual se relacionan cuantitativamente las variables descritas. El modelo permite calcular las pérdidas de peso y el tiempo máximo de almacenamiento a unas condiciones dadas. Una discusión del modelo se hace a continuación.

En general, la corteza de un producto agrícola puede considerarse como una combinación de zonas que presentan una "resistencia" diferencial al movimiento del vapor de agua. Figura 1.

Ciertas áreas de la superficie se pueden comportar como "superficies libres"; la siguiente ecuación gobierna el proceso de transferencia de masa en tales superficies:

$$\dot{M}_w = h_d \frac{M}{R_o T} A (P_{ws} - P_{w\infty}) \quad (1)$$

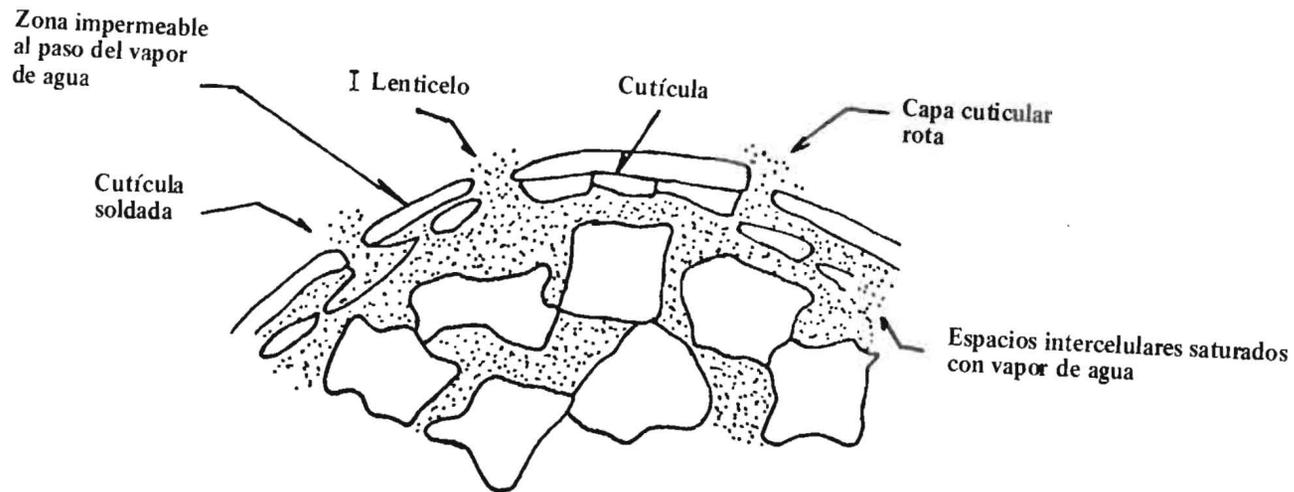


Figura 1.- Diagrama Esquemático de la Corteza de un Producto Hortícola. Se muestran las Distintas Rutas que el Vapor de Agua puede seguir al salir del Producto. Adoptado de Mitchell et al (1972).

Otras regiones de la superficie se comportan como membranas y su contribución a la pérdida de peso puede predecirse por medio de la ley de Fick aplicada a membranas.

$$\dot{M}_w = - \frac{D_{wa}}{r\delta} \times A \times \frac{M}{R_0 T} (P_o - P_s) \quad (2)$$

Finalmente, regiones de la corteza pueden ser impermeables al vapor de agua y por lo tanto, la pérdida neta de agua a través de estas zonas es cero:

$$\dot{M}_w = 0 \quad (3)$$

El comportamiento total de un producto en relación con la pérdida de peso es definida por la magnitud relativa de tales regiones y por el valor de los parámetros de las ecuaciones que gobiernan el proceso.

En el siguiente análisis se utiliza una analogía eléctrica para modelar la corteza de un producto agrícola. En la Figura 2 se muestra el circuito eléctrico equivalente, el cual representa las diferentes rutas que el vapor de agua puede seguir al salir del producto. En dicha figura se presentan también las ecuaciones que gobiernan el proceso.

La primera ruta corresponde a la región de la corteza que se comporta como una "superficie libre". La ecuación que cuantifica la pérdida a través de esta ruta es entonces:

$$\dot{M}_{w1} = \frac{M h_d \gamma_1 A}{R_0 T} (P_{ws} - P_{w\infty}) \quad (4)$$

La segunda ruta corresponde a la porción del área total que se comporta como una membrana porosa. Dos resistencias en serie, una representando la difusión a través de la membrana y la otra analogando el proceso de convección, caracterizan esta ruta. La ecuación que describe las pérdidas de humedad a través de esta ruta es:

$$\dot{M}_{w2} = \frac{\frac{1}{\frac{r\delta R_0 T}{M D_{wa} \gamma_2 A} + \frac{R_0 T}{M h_d \gamma_2 A}}}{(P_{ws} - P_{w\infty})} \quad (5)$$

* (Ver sección de símbolos donde aparece la definición y unidades de cada término. Una tabla para transformación de unidades del sistema inglés al sistema SI aparece en el Apéndice A).

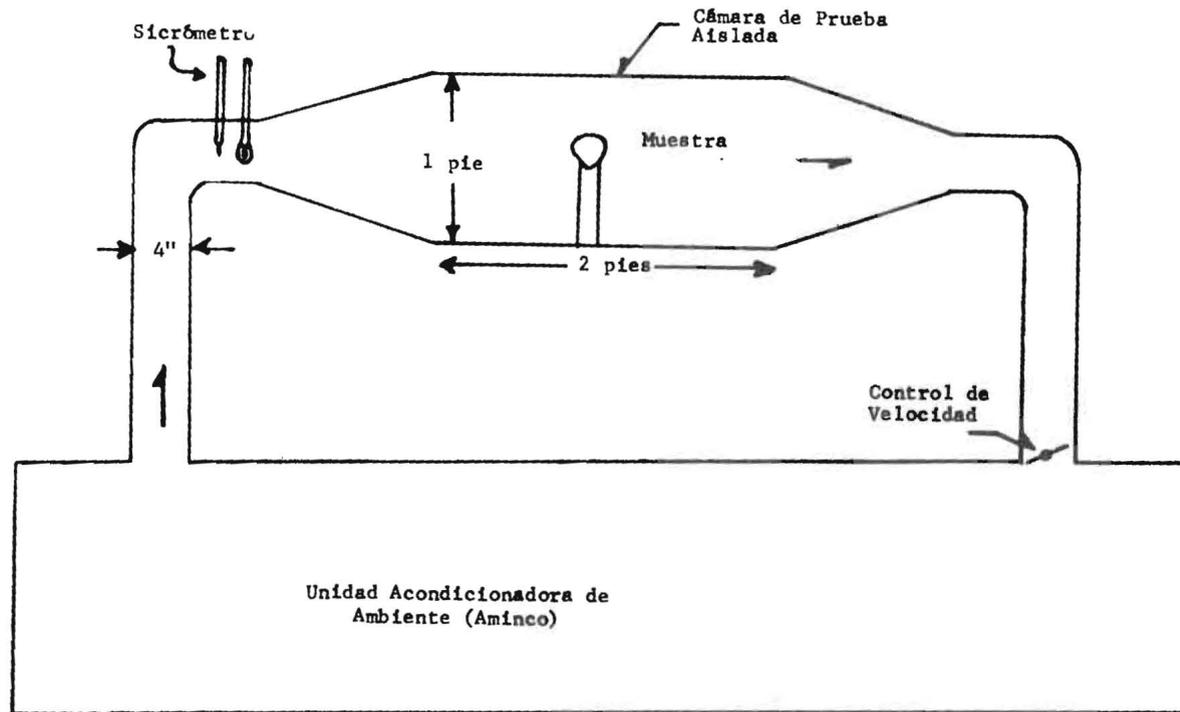


Figura 3.— Esquema del Equipo Utilizado para las Pruebas de Pérdida de Peso.

Finalmente, la tercera ruta puede analogarse a un circuito abierto, el cual corresponde a regiones impermeables en la corteza:

$$\dot{M}_{w_3} = 0 \quad (6)$$

La pérdida total del producto puede calcularse entonces como la suma de las pérdidas parciales:

$$\dot{M}_w = \dot{M}_{w_1} + \dot{M}_{w_2} + \dot{M}_{w_3} \quad (7)$$

Un análisis de las variables y de los parámetros del modelo descrito por las ecuaciones (4), (5), (6) y (7) se representa seguidamente.

El coeficiente de transferencia de masa, h_a , no tiene un valor constante, sino que es función de posición sobre la superficie del producto. Desafortunadamente, la variación de h_a con posición se conoce sólo para casos en los cuales no ocurre separación de flujo. Valores promedios deben usarse como la mejor aproximación.

Relaciones para calcular el coeficiente de transferencia flujo de masa sobre diferentes formas geométricas se encuentran en la literatura. Los productos agrícolas pueden aproximarse a tales formas. En el caso de la papa, ésta puede aproximarse a un esferoide tipo "prolate", aunque la variabilidad de forma de cada muestra individual limita el uso de tal aproximación.

Villa (1973) encontró que para la papa una buena aproximación para el cálculo de un valor promedio h_a es:

$$S_h = 0,344 \quad R_e \quad 0,539 \quad (8)$$

en donde el diámetro de una esfera de la misma área planimétrica de la muestra, fue considerada como dimensión característica para el cálculo de h_a de la ecuación (8).

La determinación del área superficial de un producto es de naturaleza empírica. Las ecuaciones para la predicción del área superficial se aplican únicamente a la variedad para la cual son desarrolladas. Esto es particularmente cierto en el caso de relaciones área superficial-peso. Villa (1973) desarrolló la siguiente relación para el cálculo del área superficial de papa de la variedad Manona:

$$A = 0,3018 \quad W \quad 0,6639 \quad (9)$$

Debido a que la ecuación (9) está limitada únicamente a la variedad para la cual fue desarrollada, un objetivo del presente trabajo fue la determinación de relaciones para calcular el área superficial de las variedades estudiadas.

El potencial o déficit de presión de vapor (voltaje en la analogía eléctrica) merece consideración especial. En general, en la mayoría de la literatura revisada se encontró que para el cálculo del déficit de presión de vapor se considera una presión en la superficie igual a la presión de saturación a la temperatura de bulbo seco del medio circundante. A pesar de que esta aproximación puede ser suficiente para productos con corteza altamente impermeables, para productos que pierden cantidades con-

siderables de agua puede llevar a resultados erróneos, Burton (1966), Butchbaker (1970) y Villa (1973) encontraron que para el caso de la papa tal consideración es suficientemente aproximada.

Villa (1973) presenta una fórmula que sirve para predecir en forma más exacta la presión de vapor en la superficie del producto. Dicha fórmula puede usarse para casos en donde se dude de la aproximación a que se refiere el párrafo anterior.

Los parámetros γ_1 , γ_2 , r y δ caracterizan en general el comportamiento de la corteza de un producto en relación con las pérdidas de peso. De estos cuatro parámetros únicamente tres son independientes: r y δ no pueden determinarse simultáneamente utilizando el modelo descrito.

El producto $r\delta$ debe considerarse y determinarse como un sólo parámetro.

El comportamiento particular de un producto puede permitir simplificaciones en el modelo. Para algunos productos la fracción del área total que se comporta como una superficie libre puede ser despreciable en comparación con el área que se comporta como una membrana porosa. En tales casos $\gamma_1 = 0$ y el efecto de la velocidad del medio será una variable de importancia menor en el proceso. Por otro lado, para otros productos las regiones que se comportan como membranas porosas pueden ser despreciables en comparación con zonas de "superficie libre". En tales casos el parámetro γ_1 representa un área efectiva de pérdida de peso. Finalmente la corteza de algunos productos puede considerarse aproximadamente impermeable a la migración de humedad.

Villa (1973) encontró que para la variedad Manona de papa, los parámetros que caracterizan su comportamiento en relación con la pérdida de peso son: $\gamma_1 = 0$, $\gamma_2 = 0,00890$ y $r\delta = 0,01148$ pies. Encontró además que existe una relación lineal entre el parámetro $r\delta$ y el déficit de presión de vapor. La presente ecuación describe esta relación:

$$r\delta = 0,00162 + 0,00052 \text{ (VPD)} \quad (10)$$

Dos tipos de problemas pueden considerarse en relación con el modelo: el "inverso" que consiste en estimar los parámetros a partir de datos obtenidos en el laboratorio sobre pérdida de peso, y el "clásico" en el cual se calculan las pérdidas de peso, una vez los parámetros se conocen. Ambos problemas serán motivo de estudio en la presente investigación.

2.2 Pérdida de peso en Algunas Variedades de Papa:

Escasa información fue encontrada en la literatura sobre la pérdida de peso en diferentes variedades de papa. En la Tabla N° 1 se presentan los valores encontrados para algunas variedades de papa. En la literatura consultada no se encontró ninguna referencia sobre variedades de papa colombianas.

TABLA Nº 1 INFORMACION SOBRE LA PERDIDA DE PESO DE ALGUNAS VARIEDADES DE PAPA

Variedad	Características de la Muestra	Temperatura °F	Humedad Relativa %	Velocidad de Pérdida de Peso	Ref.	Observaciones
				Ib agua		
				lb de papa-hr-lbf/pie ²		
Kennebec	No curada	38-40	98-100	29,569 x 10 ⁻⁶	Lentz (1971)	Se utilizó un flujo de aire de 10 pies/min. en todas las pruebas. Las papas fueron curadas manteniendo su temperatura a 50 °F y HR a 90-100% por 10-14 días (pérdida de peso de 1-1-1/2%) antes del almacenamiento. Las muestras para las distintas pruebas eran de 6 a 9 papas.
	Curada			10,457 x 10 ⁻⁶		
Katahdin	No curada	"	"	7,212 x 10 ⁻⁶		
	Curada			4,327 x 10 ⁻⁶		
Sebago	No curada	"	"	27,405 x 10 ⁻⁶		
	Curada			6,491 x 10 ⁻⁶		
Warba	No curada	"	"	9,736 x 10 ⁻⁶		
	Curada			5,409 x 10 ⁻⁶		
Netted Gem	Curada	"	"	5,770 x 10 ⁻⁶		

Schippers (1971) encontró una velocidad de pérdida de 2,682 x 10⁻⁶ libras de agua/libra de papa-hr-lbf/pie² para las variedades de Katahdin y Russet.

Burton (1966) presenta una velocidad promedio de pérdida de 0,736 x 10⁻⁵ a 1,104 x 10⁻⁵ lbs. de agua/pie² hr-lbf/ft² para distintas variedades de papa.

III. OBJETIVOS

- 1.- Desarrollo de fórmulas para la predicción del área superficial en partículas individuales de las variedades de papa Capiro y Puracé.
- 2.- Determinación de los parámetros γ_1 , γ_2 y $r\delta$ que caracterizan el comportamiento de las variedades de papa Capiro y Puracé en relación con la pérdida de peso en almacenamiento.
- 3.- Preparación de gráficos para la Predicción de pérdida de peso y tiempos máximos de almacenamiento a diferentes condiciones, para las variedades Capiro y Puracé.

IV. METODOLOGIA

Para cumplir con los objetivos, se llevó a cabo una serie de experimentos durante el primer semestre de 1975 en el laboratorio de Ingeniería de Procesos Agrícolas de la Facultad de Ciencias Agrícolas. Seguidamente se describirá el equipo y procedimiento que se utilizó para las distintas fases de la investigación.

4.1 *Desarrollo de Fórmulas para Predecir el Area Superficial de cada una de las Variedades de Papa Estudiadas:*

Para cada variedad, se tomó un número de 60 muestras individuales, cuyos tamaños cubrían el rango característico de cada una.

Para obtener el área de la corteza, cada muestra se peló en capas de un ancho no mayor de 1 cm. El área de cada capa se calculó por medio de un planímetro y la suma de las medidas parciales en una muestra constituyó el área total experimental. La muestra se pesó antes de pelarla en una balanza eléctrica, de una precisión hasta centésimas de gramo.

Se trataron los modelos:

$$A = \beta_0 + \beta_1 W_0 \quad (11)$$

$$A = \beta_0 W_0^{\beta_1} \quad (12)$$

$$A = \beta_0 (\beta_1)^{W_0} \quad (13)$$

con el objeto de determinar la mejor relación Area-Peso. Como criterio para escoger el mejor modelo, se utilizó la suma de los cuadrados de los "residuos", siendo el modelo más adecuado aquel en el cual dicha suma sea mínima, Beck (1973). Para el análisis de la información y escogencia del mejor modelo se elaboró un programa de computador.

4.2 *Determinación de los Parámetros γ_1 , γ_2 , y $r\delta$ de las Variedades de Papa Estudiadas:*

Una serie de experimentos se llevó a cabo para determinar los parámetros que caracterizan el comportamiento de las variedades Capiro y Puracé en relación con la pérdida de peso.

Los experimentos consistieron fundamentalmente en la medida de la pérdida de peso en muestras individuales colocadas en una cámara de prueba, durante un período de 3 días.

La cámara de pruebas, Figura 3, construída en el laboratorio, consistía fundamentalmente en una caja de madera aislada con Icopor, de 2 pies de largo y 1 pie cuadrado de área transversal.

La temperatura y humedad relativa fueron medidas con un sicrómetro y la velocidad del aire con un anémometro Taylor de aspas rotacionales.

Una unidad Aminco-Aire* fue utilizada para el acondicionamiento del ambiente. Debido a la variabilidad esperada, cuatro muestras se colocaron en la cámara durante cada experimento.

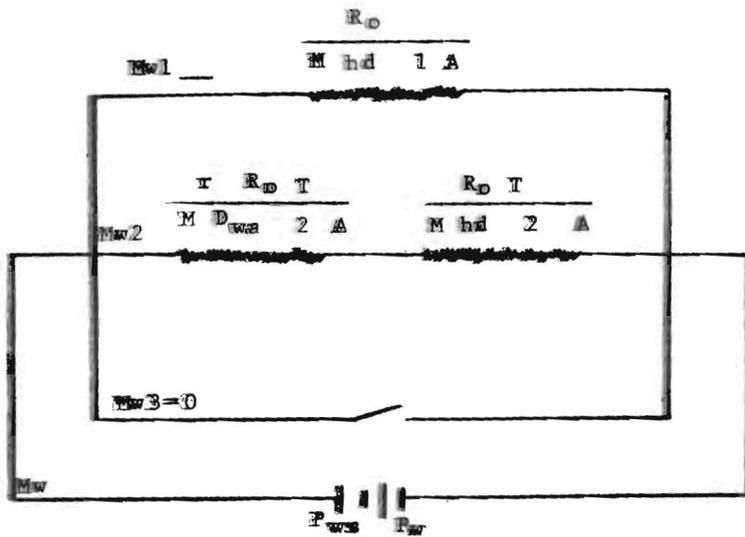
El siguiente fue el procedimiento seguido en cada prueba:

- 1.- Las muestras, las cuales habían sido obtenidas en el mercado mayorista, eran clasificadas, rechazando las que presentaban daños mecánicos, y colocadas en un cuarto frío a 40 °F. Al iniciar cada prueba se pesaban individualmente y se colocaban en la cámara de pruebas.
- 2.- Se efectuaban pesadas de cada muestra cada 24 horas.
- 3.- Después de 3 días se sacaban las muestras, se pelaban y se les determinaba el área planimétrica.

Se llevaron a cabo diez pruebas diferentes para cada variedad. Las siguientes fueron las condiciones experimentadas:

Temperatura °F	Humedad Relativa %	VPD	Velocidad Aire ft/hr.
50	75,0	6,4	6,000
60	75,0	9,2	6,000
70	75,0	13,0	6,000
60	62,5	13,8	6,000
80	75,0	18,1	6,000
70	62,5	19,5	6,000
70	50,0	26,0	1,500
70	50,0	26,0	3,000
70	50,0	26,0	6,000
70	50,0	26,0	9,000

* Hydrodynamics, Inc. Silver Spring, Maryland.



Ecuaciones que gobiernan el Proceso :

$$M_{w1} = \left(\frac{M_{hd} \ 1 \ A}{R_D \ T} \right) (P_{ws} - P_w) \quad (4)$$

$$M_{w2} = \left(\frac{1}{\frac{r \ R_D \ T}{M_{D_{ws}} \ 2 \ A} + \frac{R_D \ T}{M_{hd} \ 2 \ A}} \right) (P_{ws} - P_w) \quad (5)$$

$$M_{w3} = 0 \quad (6)$$

$$M_w = M_{w1} + M_{w2} + M_{w3} \quad (7)$$

Figura 2.— Analogía Eléctrica para Representar el Comportamiento de la Corteza de un Producto en Relación con la Pérdida de Peso.

Con los datos experimentales obtenidos fue posible determinar los parámetros y estudiar el efecto de cada variable sobre los mismos.

Para la determinación de los parámetros y el análisis de la influencia de las distintas variables sobre ellos, se desarrolló un programa de computador. El programa se "alimentó" con la información obtenida en el laboratorio, la cual se aplicó al modelo expresado por las Ecuaciones (4), (5), (6) y (7). Técnicas estandar compiladas por Beck (1973) se utilizaron para el desarrollo del programa de computadores.

4.3 *Desarrollo de Gráficos para la Predicción de Pérdida de Peso y Tiempo Máximo de Almacenamiento en las Variedades Estudiadas:*

Los parámetros obtenidos experimentalmente se aplicaron al modelo matemático para obtener gráficos de predicción de las pérdidas de peso a diferentes condiciones de almacenamiento.

Para cada variedad se elaboraron dos tipos de gráficos. El primero puede usarse para determinar la velocidad de pérdida de peso por unidad de área (o por unidad de peso) a diferentes condiciones de almacenamiento. El segundo puede usarse para predecir el tiempo máximo permitido, a diferentes condiciones de almacenamiento, antes de que se presente un porcentaje de pérdida de peso dado.

En base a estas predicciones fue posible analizar las limitaciones que existen en el almacenamiento de estas variedades, al utilizar el aire ambiental como medio para la conservación del producto.

V. RESULTADOS Y DISCUSION

5.1. *Predicción de Area Superficial de Partículas Individuales en Papa:*

Con los datos obtenidos experimentalmente se desarrollaron relaciones de área superficial, peso en partículas individuales de papa para las dos variedades en estudio. Se escribió una rutina de computador, ALEASQ, para estimar los parámetros de β_0 y β_1 del modelo lineal $A = \beta_0 + \beta_1 W_0$, ALEASQ que también lineariza los modelos $A = \beta_0 W_0^{\beta_1}$ y $A = \beta_0 (\beta_1)^{W_0}$ pudiéndose determinar igualmente β_0 y β_1 de los modelos linearizados. La rutina finalmente efectúa un análisis estadístico de los parámetros estimados.

Los resultados obtenidos al aplicar la rutina a los datos experimentales en cada variedad se discuten a continuación.

5.1.1. Variedad Capiro.

La Tabla 2 presenta las sumas de cuadrados de los "residuos" al aplicar los modelos:

$$A = \beta_0 + \beta_1 W_0$$

$$A = \beta_0 (W_0)^{\beta_1}$$

y

$$A = \beta_0 (\beta_1)^{W_0}$$

a los datos experimentales para esta variedad. Se encontró que la suma de cuadrados de los "residuos" era menor para el modelo $A = \beta_0 (W_0)^{\beta_1}$, siendo éste, por lo tanto, el mejor modelo de predicción entre los tres aplicados.

El análisis de mínimos cuadrados para el modelo seleccionado dió la siguiente relación peso-área superficial para partículas individuales de papa Puracé:

$$A = 0,31422 W_0^{0,63860} \quad (14)$$

TABLA N^o 2 Sumas de cuadrados de los "residuos" y valor de los parámetros para los modelos a los cuales se aplicó la información de peso (W_0) y Area (A) para la variedad de papa Puracé

Modelo	β_0	β_1	Suma de cuadrados de residuos $\sum (A - \hat{A})^2$
$\hat{A} = \beta_0 (\beta_1)^{W_0}$	0,05278	0,30725	0,001359
$\hat{A} = \beta_0 W_0^{\beta_1}$	0,31422	0,63860	0,000324
$\hat{A} = \beta_0 + \beta_1 W_0$	0,07462	8,91218	0,005720

En la Figura 4 se presenta la comparación entre los datos experimentales y la predicción obtenida a partir de la Ecuación (14)

El análisis estadístico correspondiente a la Ecuación (14) se presenta en las Tablas 3 y 4. Se obtuvo un alto coeficiente de determinación ($R_1^2 = 0,93408$). El valor de F calculado fue notablemente superior al F tabulado al límite de confianza del 99%. Por otra parte los intervalos de confianza al 99% para β_0 y β_1 fueron $0,29074 < \beta_0 < 0,33959$ y $0,57927 < \beta_1 < 0,69793$.

TABLA N° 3 Estimativos de varianza y desviaciones estandar de la variable dependiente y de los parámetros de la representación linear de la Ecuación (14).

I	Estimativo de la varianza de Var (I)	Estimativo de la desviación Standar de I D. E. (I)
$L_n (A)$	0,00111	0,03334
$L_n (\beta_0)$	0,00085	0,02915
β_1	0,00049	0,02227

Coefficiente de determinación $R_1^2 = 0,93408$.

99% Intervalo de Confidencia para β_0 : $0,29074 < \beta_0 < 0,33959$.

99% Intervalo de Confidencia para β_1 : $0,57927 < \beta_1 < 0,69793$.

TABLA N° 4 Tabla de Partición Alrededor de la Media para la Representación Linear de la Ecuación (14).

Fuente de Variación	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrado Medio	F
1. Residuos	0,0644	58	0,0011	$F_{\text{calculado}}$ 821,8895
2. Desviación entre la línea y la medida	0,9138	1	0,9138	
3. Total	0,9783	59		$F_{0,01}$ Tabla 7,08

5.1.2. Variedad Capiro:

En la Tabla 5 se presentan la suma de cuadrados de los "residuos y el valor de los parámetros β_0 y β_1 cuando los datos experimentales de peso y área planimétrica para partículas individuales de la variedad Capiro fueron aplicados a los modelos:

$$\begin{aligned}
 A &= \beta_0 + \beta_1 W_0 \\
 A &= \beta_0 W_0^{\beta_1} \\
 \text{y} \quad A &= \beta_0 (\beta_1) W_0
 \end{aligned}$$

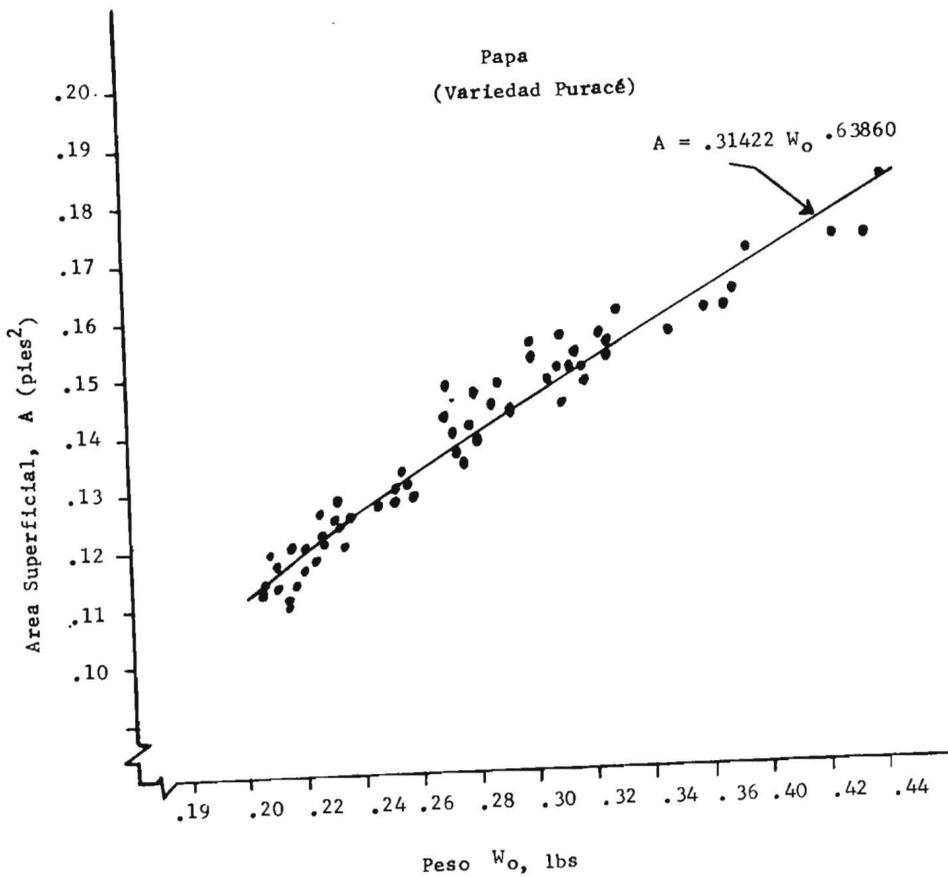


Figura 4. — Relación Peso-Area Superficial para Partículas individuales de Papa Variedad Puracé.

Se encontró igualmente que la suma de cuadrados de los "residuos" era menor para el modelo $A = \beta_0 W_0^{\beta_1}$, siendo éste el mejor modelo de predicción entre los tres aplicados.

La aproximación de mínimos cuadrados para el modelo seleccionado dió la siguiente relación de peso-área superficial para partículas individuales de papa Capiro:

$$A = 0,28613 W_0^{0,56545} \quad (15)$$

TABLA N° 5 Suma de Cuadrados de los "Residuos" y valor de los Parámetros para los Modelos a los cuales se aplicó la información de Peso (W_0) y Area (A) para la variedad de Papa Capiro.

Modelo	β_0	β_1	Suma de cuadrados de "residuos" $\Sigma(A - \hat{A})^2$
$\hat{A} = \beta_0 + \beta_1 W_0$	0,06289	0,27137	0,001485
$\hat{A} = \beta_0 (\beta_1)^{W_0}$	0,28613	0,56545	0,000473
$\hat{A} = \beta_0 W_0^{\beta_1}$	0,07877	7,43676	0,007352

En la Figura 5 aparece la comparación entre los datos experimentales y la predicción obtenida a partir de la Ecuación (15).

El análisis estadístico correspondiente a la Ecuación (15) se presenta en las Tablas 6 y 7. Se obtuvo un alto coeficiente de determinación ($R_1^2 = 0,88705$). El Valor de F calculado fue notablemente superior al F tabulado al límite de confianza del 99%. Por otra parte los intervalos de confianza al 99% para β_0 y β_1 fueron $0,26113 < \beta_0 < 0,31352$ y $0,49488 < \beta_1 < 0,63602$.

TABLA N° 6 Estimativos de la Varianza y Desviación Estandar de la Variable de Pendiente y de los Parámetros de la Representación Linear de la Ecuación (15).

I	Estimativo de la varianza de I Var (I)	Estimativo de la Desviación Standar de I D. E. (I)
$L_m (A)$	0,00124	0,03535
$L_m (\beta_0)$	0,00117	0,03432
β_1	0,00070	0,02649

99% Intervalo de Confidencia para β_0 : $0,26113 < \beta_0 < 0,31352$.

99% Intervalo de Confidencia para β_1 : $0,49488 < \beta_1 < 0,63602$

TABLA N^o 7 Tabla de Partición Alrededor de la Media para la Representación Lineal de la Ecuación (15).

Fuente de Variación	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrados Medio	F
1. Residuos	0,0724	58	0,0012	F _{calculado} 455,5211
2. Desviación entre la línea y la media	0,5692	1	0,5692	
3. Total	0,6417	59		F _{0,01 Tabla} 7,08

5.2. *Determinación de los Parámetros de la Corteza de las Variedades de Papa Puracé y Capiro.*

Los datos experimentales sobre pérdida de peso a diferentes condiciones de almacenamiento fueron aplicados a las Ecuaciones (4), (5), (6) y (7) con el objeto de determinar los parámetros de la corteza γ_1 , γ_2 , y $r\delta$ en cada una de las variedades estudiadas.

Se elaboró un programa de computador con el cual es posible determinar parámetros que se presentan en modelos no lineares. El programa desarrolla básicamente el método conocido en la literatura como de Gauss-Newton o Gaus-Seidel, el cual es descrito por Beck (1973).

El método es conceptualmente muy simple: lineariza el modelo en una serie truncada de Taylor con el objeto de permitir el uso del análisis lineal, consiguiéndose minimizar la suma de cuadrados de los residuos por medio de un proceso relativo. Se dan valores inicialmente a los parámetros; cíclicamente el programa genera nuevos estimativos utilizando un método que tiene base en el algoritmo Newton-Raphson. Los cálculos se repiten hasta que se cumple un criterio de convergencia establecido.

En la aplicación de los datos experimentales a las ecuaciones (4), (5), (6) y (7) se utilizó la ecuación (8) para el cálculo del coeficiente de transferencia de masa por convección, h_a . El déficit de presión de vapor se estimó como la diferencia entre la presión de vapor de saturación del agua a la temperatura de bulbo seco y la presión de vapor de agua del medio.

Al "alimentar" la rutina no linear con los datos experimentales y las ecuaciones descritas en el párrafo anterior, se observó un comportamiento semejante en las dos variedades estudiadas. Los resultados dieron un va-

lor comparativamente pequeño para el parámetro γ_1 (de un orden de magnitud entre 10^{-6} y 10^{-11}). Debido a este efecto despreciable de parámetro γ_1 sobre la pérdida de peso, y a que se observó una tendencia decreciente del valor del parámetro γ_1 en cada interacción, el modelo se simplificó haciendo $\gamma_1 = 0$. Se observó un decrecimiento en la suma de cuadrados de los residuos cuando se utilizó el modelo simplificado.

La simplificación del modelo permitió además linearizar el modelo de predicción, pudiéndose utilizar la rutina ALEASQ para determinar los parámetros γ_2 y $r\delta$. La Ecuación (16) representa el modelo simplificado y linearizado:

$$\frac{1}{h'_d} = \frac{R_0 T}{M D_{wa}} \left(\frac{r\delta}{\gamma_2} \right) + \left(\frac{R_0 T}{M \gamma_2} \right) \left(\frac{1}{h_d} \right) \quad (16)$$

Al efectuar una serie de experimentos de pérdida de peso a las mismas condiciones de almacenamiento (temperatura y humedad relativa constantes), pero variando la velocidad del aire, es posible utilizar la ecuación (16) para determinar γ_2 y $r\delta$, para un déficit de presión de vapor dado. Una vez conocidos los parámetros a estas condiciones, se puede efectuar otro grupo de experimentos manteniendo la velocidad constante y variando el déficit de presión de vapor (diferentes combinaciones de temperatura y humedad relativa) con el objeto de determinar el efecto del déficit de presión de vapor sobre el parámetro $r\delta$. Seguidamente se presentan los resultados obtenidos al aplicar la sistemática descrita anteriormente, a cada variedad.

5.2.1. Variedad Puracé.

La Figura 6 presenta el resultado de la investigación efectuada a una temperatura de 70 °F y 50% de humedad relativa ($VPD = 26 \text{ lbf/pie}^2$).

La velocidad se varió de 1.500 pies/hr. hasta 9.000 pies/hr. Se obtuvieron valores de $\gamma_1 = 0$, $\gamma_2 = 0,04266$ y $r\delta = 0,012362$ pies, al aplicar los datos experimentales de 16 muestras a la rutina ALEASQ.

Expresados en términos físicos, los resultados muestran que en la corteza de la variedad Puracé las regiones que se comportan como "superficies libres" son de naturaleza despreciable en relación con la pérdida de peso. Como resultado de lo anterior la velocidad del aire no afecta en forma considerable las pérdidas de peso de esta variedad. Los resultados mostraron además que se puede considerar la corteza de la papa Puracé impermeable en un 95,7% al paso del vapor de agua.

El estudio de la influencia del déficit de presión de vapor sobre el parámetro $r\delta$ se efectuó en 28 muestras que se colocaron a diferentes condiciones ambientales, cubriendo un rango de 6-26 lb/pie² de déficit de presión del vapor (obtenido con diferentes combinaciones de temperatura y humedades relativas). La velocidad se mantuvo constante a 6000 pies/hr. Las ecuaciones (16) y (8) fueron utilizadas para calcular el parámetro $r\delta$, a cada condición de déficit de presión de vapor experimentada.

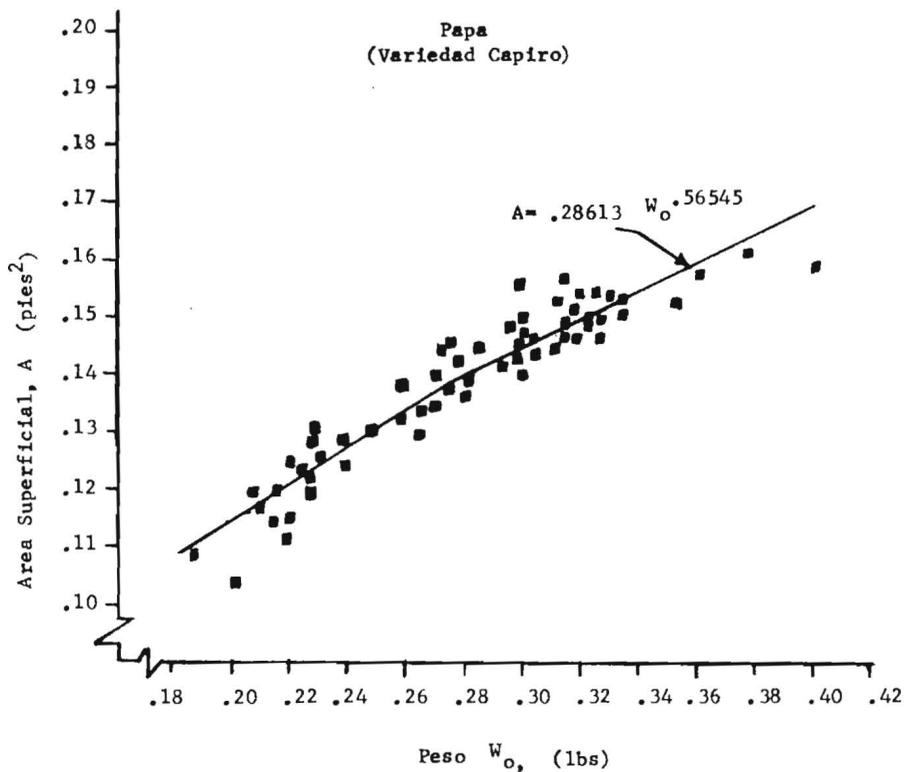


Figura 5.— Relación Peso-Area Superficial para Partículas Individuales de Papa Variedad Capiro.

$$\begin{array}{ll}
 T & = 70 \text{ }^{\circ}\text{F} & D_{wa} & = .967 \text{ (pies}^2\text{/hr)} \\
 HR & = 50\% & R_o & = 1544 \\
 VPD & = 26 \text{ lbf/pie}^2 & M & = 18
 \end{array}$$

$$\frac{1}{h'd} = \left(\frac{R_o T}{M D_{wa}} \right) \left(\frac{r \delta}{\sqrt{2}} \right) + \left(\frac{R_o T}{M} \right) \left(\frac{1}{hd} \right)$$

$$\left(\frac{R_o T}{M D_{wa}} \right) \left(\frac{r \delta}{\sqrt{2}} \right) = 13758.75$$

$$\frac{R_o T}{M \sqrt{2}} = 1066209.19$$

$$\sqrt{2} = .04266$$

$$r = .012362 \text{ (pies)}$$

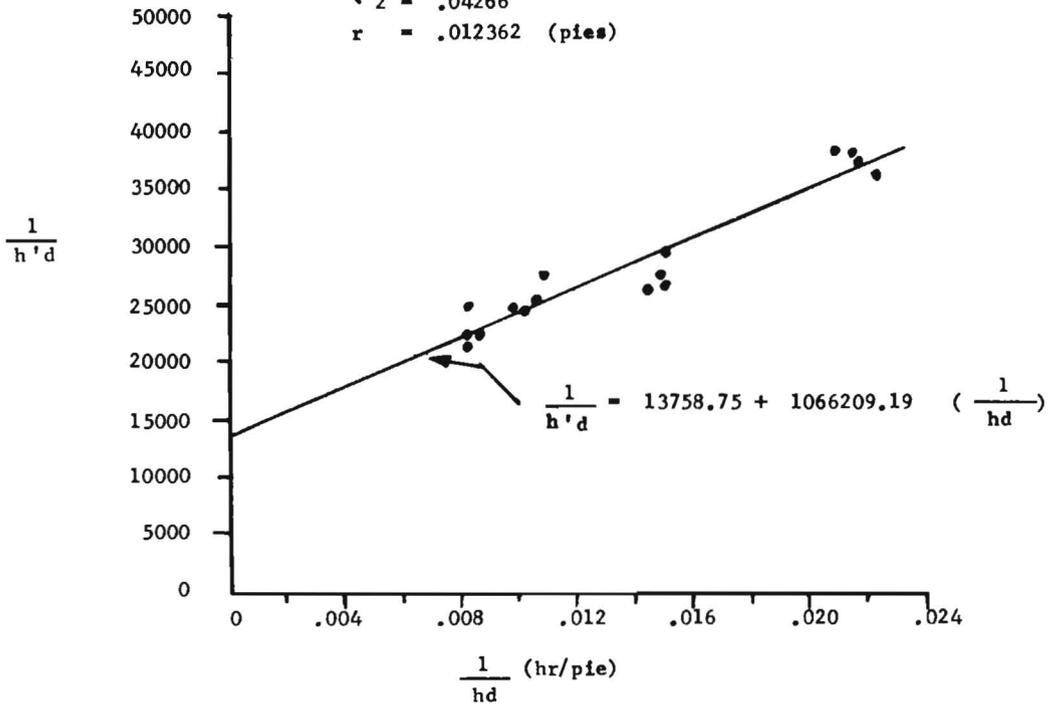


Figura 6.— Relación $1/hd$ versus $1/h'd$. a partir de la cual se obtuvieron los parámetros $\sqrt{2}$ y r a 70°F y 50% de humedad relativa, para la Papa Puracé.

Valores de $\gamma_1 = 0$ y $\gamma_2 = 0,04266$ fueron utilizados como los otros dos parámetros de la corteza de la papa Puracé.

Cuando el déficit de presión de vapor (VPD) se graficó versus $r\delta$, Figura 7, se observó una relación directa entre el parámetro $r\delta$ y el déficit de presión de vapor. La siguiente relación lineal se obtuvo al analizar los datos VPD- $r\delta$ con la rutina ALEASQ:

$$r\delta = 0,001145 + (0,000479) \text{ VPD} \quad (17)$$

5.2.2. *Varietad Capiro.*

La Figura 8 presenta el resultado de la investigación efectuada a una temperatura de 70 °F y 50% de humedad relativa ($\text{VPD} = 26 \text{ lbf/pie}^2$). La velocidad se varió de 1500 pies/hr. hasta 9000 pies/hr. Se obtuvieron valores de $\gamma_1 = 0$, $\gamma_2 = 0,009007$ y $r\delta = 0,011089$ pies, al aplicar los datos experimentales de 16 muestras a la rutina ALEASQ.

Expresados en términos físicos, los resultados muestran que, semejante a lo que ocurre en la corteza de la variedad Puracé, en la corteza de la variedad Capiro las regiones que se comportan como "superficies libres", son de naturaleza despreciable en relación a la pérdida de peso. Como resultado de lo anterior la velocidad del aire no afecta en forma considerable las pérdidas de peso de esta variedad. Los resultados demostraron además que la corteza de la papa Capiro se puede considerar impermeable en un 99,0% al paso del vapor del agua.

El estudio de la influencia del déficit de presión de vapor sobre el parámetro $r\delta$ se efectuó en 28 muestras que se colocaron a diferentes condiciones ambientales cubriendo un rango de 6-26 lb/pie² de déficit de presión de vapor (obtenido con diferentes combinaciones de temperatura y humedad relativas). La velocidad se mantuvo constante a 6000 pies/hr. Las ecuaciones (16) y (8) fueron utilizadas para calcular el parámetro $r\delta$ a cada condición de déficit de presión de vapor experimentada. Valores de $\gamma_1 = 0$ y $\gamma_2 = 0,009007$ fueron utilizados como los otros dos parámetros de la corteza de la papa Capiro.

Cuando el déficit de presión de vapor (VPD) se graficó versus $r\delta$, Figura 8, se observó, en forma semejante al caso de la variedad Puracé, que existe una relación directa entre el parámetro $r\delta$ y el déficit de presión de vapor en la papa Capiro. La siguiente relación lineal se obtuvo al analizar los datos VPD- $r\delta$ en la rutina ALEASQ:

$$r\delta = 0,003082 + (0,0003119) \text{ VPD} \quad (18)$$

5.3. *Predicción de Pérdida de Peso y Tiempo Máximo de Almacenamiento.*

Los parámetros determinados experimentalmente fueron aplicados al modelo simplificado con el objeto de obtener gráficos de predicción de las pérdidas de peso a diferentes condiciones de almacenamiento.

Temp. OF	HR %	VPD lbf/pie ²	rd (pies)
50	75	6.4	.00481
60	75	9.2	.00452
70	75	13.0	.00650
60	62.5	13.8	.00759
80	75	18.1	.01103
70	62.5	19.5	.01205
70	50.0	26.0	.01236

V = 6.000 pies/hr.

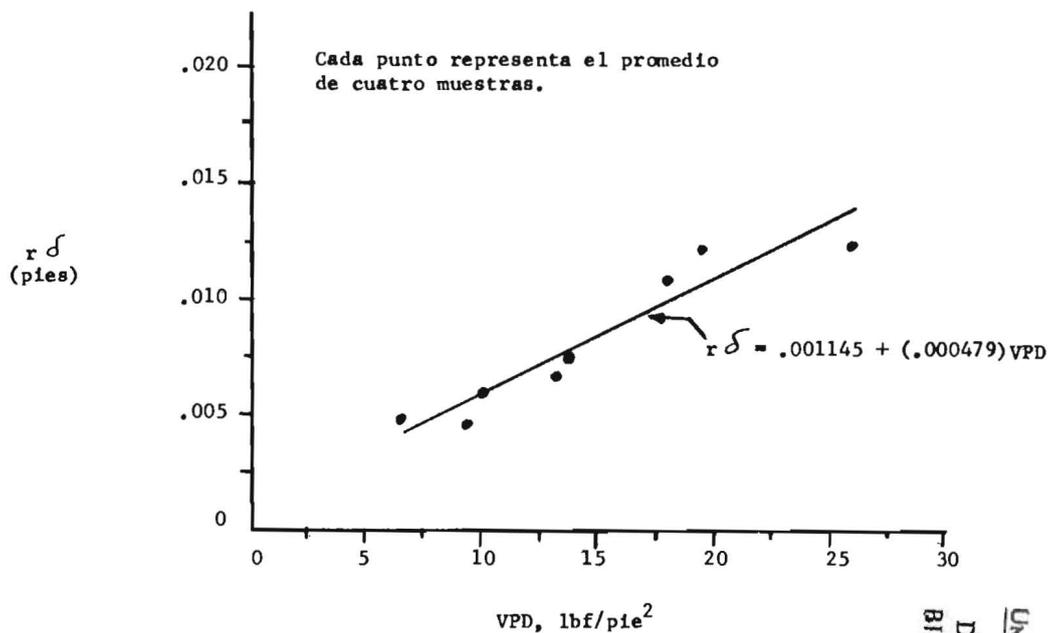


Figura 7.— Relación VPD - $r\delta$ para Papa Puracé.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SERIE MEDICINA
DPTO. DE BIBLIOTECAS
BIBLIOTECA "EFE" GOMEZ



$$\begin{array}{ll}
 T = 70^{\circ}\text{F} & D_{wa} = .967 \text{ (pies}^2\text{/hr.)} \\
 \text{HR} = 50\% & R_o = 1544 \\
 \text{VPD} = 26 \text{ lbf/pie}^2 & M = 18
 \end{array}$$

$$\frac{1}{h'd} = \left(\frac{R_o T}{M D_{wa}} \right) \left(\frac{r}{2} \right) + \left(\frac{R_o T}{2} \right) \left(\frac{1}{hd} \right)$$

$$\left(\frac{R_o T}{M D_{wa}} \right) \left(\frac{r}{2} \right) = 57902.46$$

$$\frac{R_o T}{M \gamma^2} = 5049189.1$$

$$\gamma^2 = .009007$$

$$r \delta = 011089 \text{ (pies)}$$

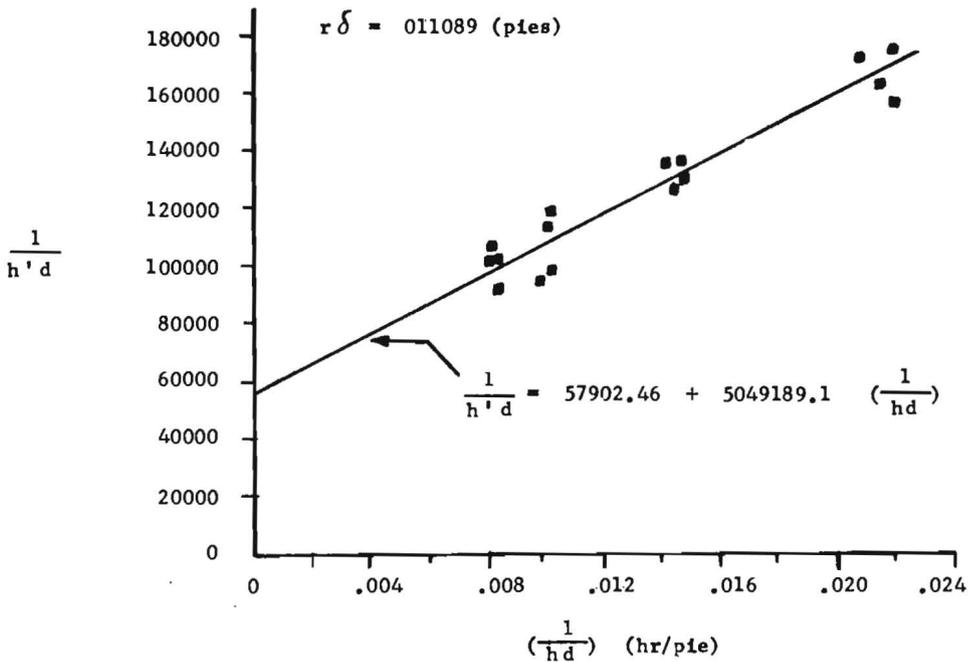


Figura 8.— Relación $1/h'd$ versus $1/h'd$, a partir de la cual se obtuvieron parámetros γ^2 y r a 70°F y 50% de humedad relativa, para la Papa Capiro.

Temp. OF	HR %	VPD lbf/pie ²	rd (pies)
50	75	6.4	.00502
60	75	9.2	.00551
70	75	13.0	.00802
60	62.5	13.8	.00750
80	75	18.1	.00750
70	62.5	19.5	.01000
70	50.0	26.0	.01109

v = 6.000 pies/hr.

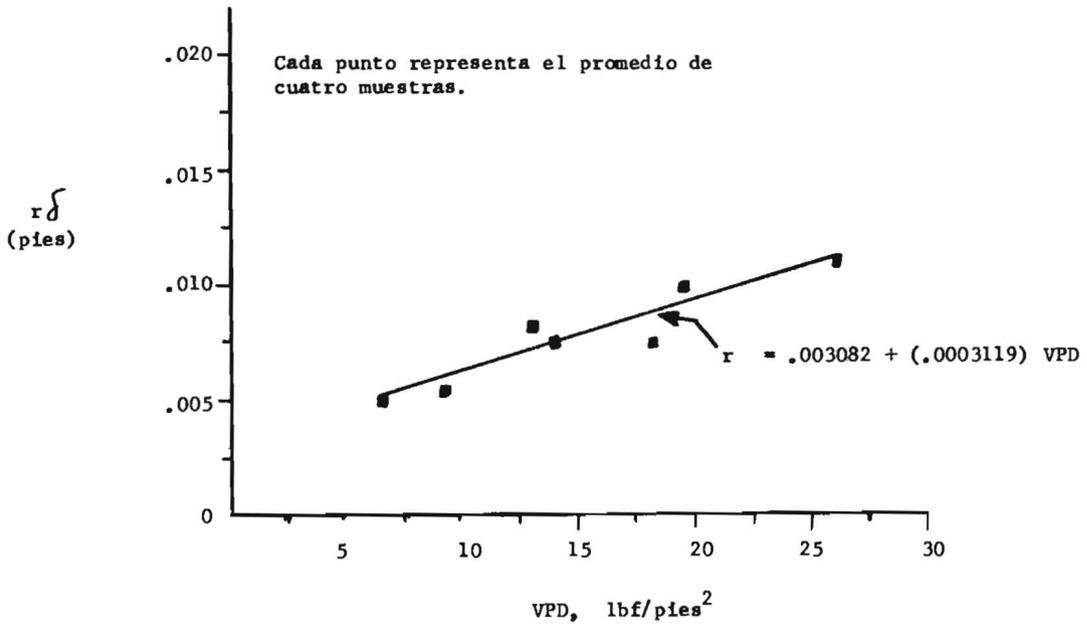


Figura 9.— Relación VPD- $r\delta$ para Papa Capiro.

Dos tipos de gráficos se presentan. El primer tipo puede utilizarse para determinar las pérdidas de peso por unidad de tiempo y por unidad de área superficial (o por unidad de peso) a diferentes condiciones de almacenamiento. El segundo tipo puede usarse para predecir el máximo tiempo que el producto puede almacenarse a diferentes condiciones de almacenamiento, antes que pierda un porcentaje de peso dado.

Se presenta seguidamente una discusión sobre el desarrollo y significancia de los gráficos para cada variedad.

5.3.1. *Variedad Puracé:*

En la figura 10 se presenta el gráfico para predecir pérdidas de peso a diferentes condiciones de almacenamiento. El déficit de presión de vapor aparece en el eje de las abscisas y la velocidad de pérdida de peso en lb/hr-pie² ó lb/hr-lb de papa, se presenta en las ordenadas. Una segunda abscisa representa la humedad relativa equivalente a una temperatura ambiental de 50°F (10°C). Una tercera abscisa representa la temperatura equivalente a una humedad ambiental del 85%. Finalmente una cuarta abscisa presenta la transformación de la tercera abscisa a grados centígrados.

La relación no lineal existente entre el déficit de presión de vapor y la velocidad de pérdida de peso de la variedad Puracé puede observarse en la Figura 10. El aumento de la resistencia del vapor de agua a medida que aumenta el déficit de presión de vapor es responsable de este comportamiento.

El efecto comparativo de las diferentes variables sobre la pérdida de peso puede estudiarse en la Figura 10. La humedad relativa es la variable más crítica, en relación con pérdida de peso. Un pequeño decrecimiento de la humedad relativa del ambiente resulta en un importante aumento en la velocidad de pérdida de peso. Por ejemplo, una reducción de 8% (de 92 a 84%) de la humedad relativa ambiental resulta en la duplicación de la velocidad de pérdida de peso a 50°F (10°C). Una duplicación similar de las pérdidas ocurre cuando la temperatura ambiental se incrementa en cerca de 20°F, por ejemplo de 33°F a 53°F a 85% de humedad relativa. Por otra parte, la duplicación de las pérdidas a 50°F (10°C) y 85% sólo ocurre cuando la velocidad del aire se quintuplica de 1500 a 7500 pies/hr.

Predicción del tiempo máximo de almacenamiento para diferentes condiciones ambientales y varios porcentajes de pérdida de peso de la variedad Puracé se presentan en las Figuras 11 y 12. Se utilizaron velocidades de 1500 y 3000 pies/hr. respectivamente.

El efecto de las diferentes variables sobre el tiempo de almacenamiento puede estudiarse en las Figuras 10 y 11. Se puede observar por ejemplo que una humedad relativa de 90 a 95% debe mantenerse para conservar la papa Puracé durante un periodo de 2 meses a 50°F (10°C) con un máximo de pérdida del 5%, a una velocidad de 1500 pies/hr. Si dicha velocidad se duplica, el tiempo de almacenamiento, bajo las mismas condiciones, se reduce en 15 días únicamente.

Papa
Variedad Puracé

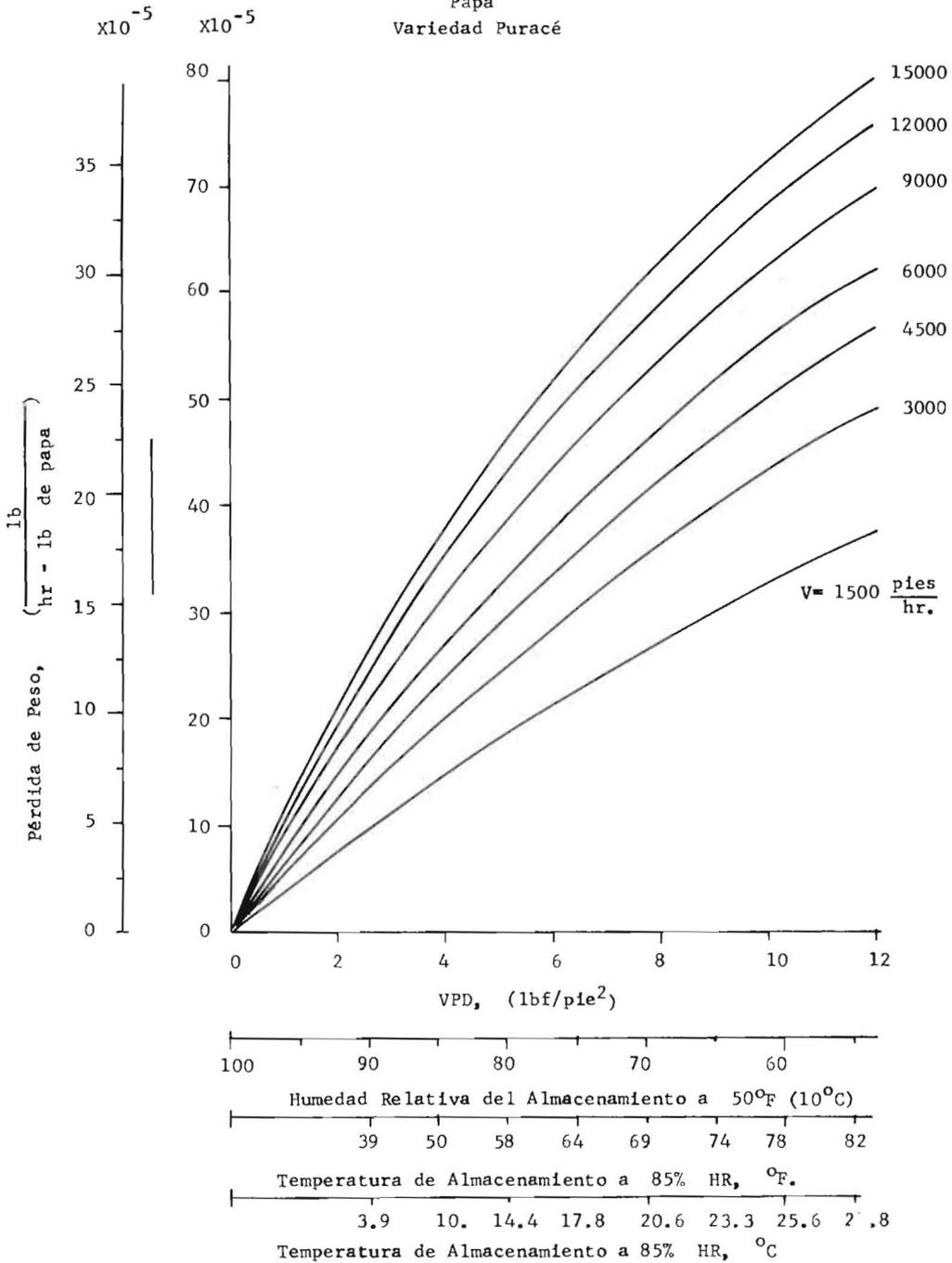


Figura 10.— Predicción de Pérdida de Peso en Papa Puracé a Diferentes Condiciones.

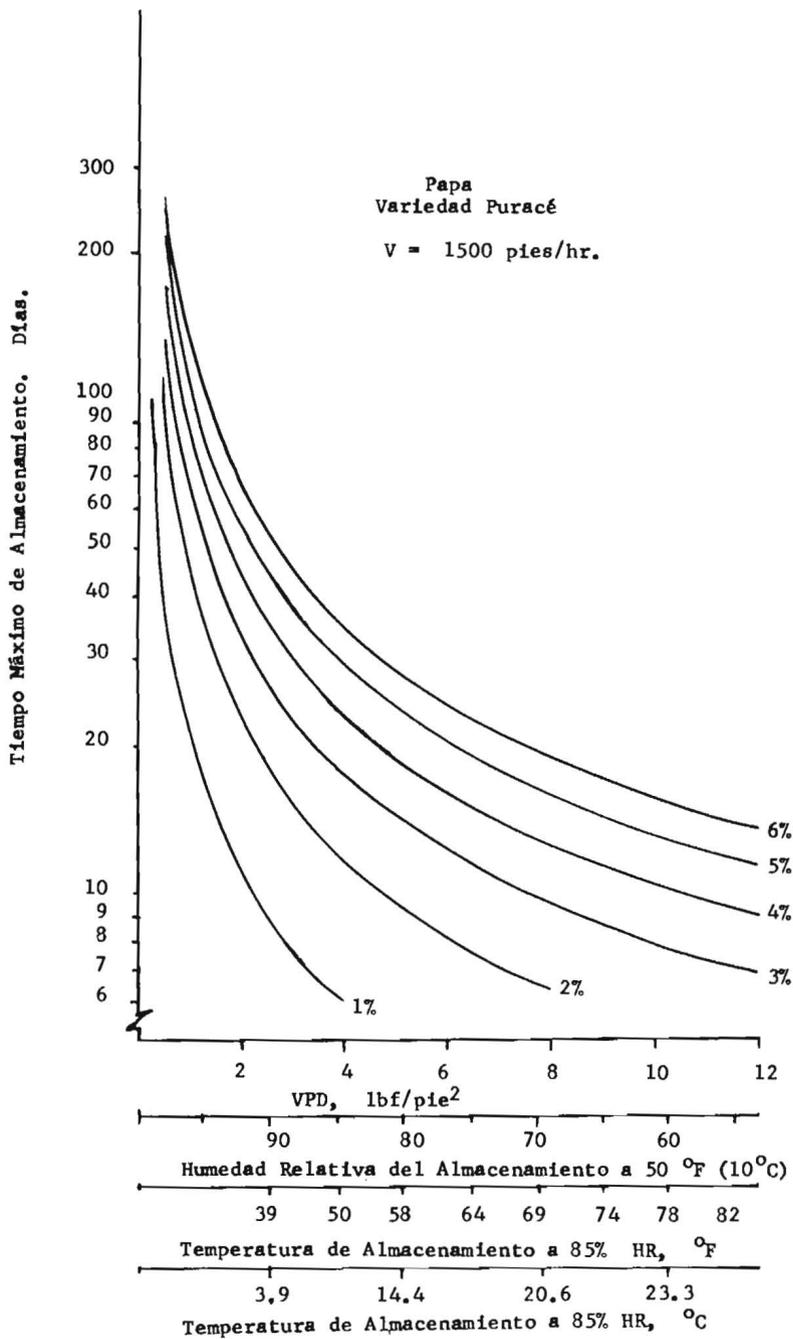


Figura 11.— Tiempo Máximo de Almacenamiento de Papa Puracé.
V = 1500 pies/hr.

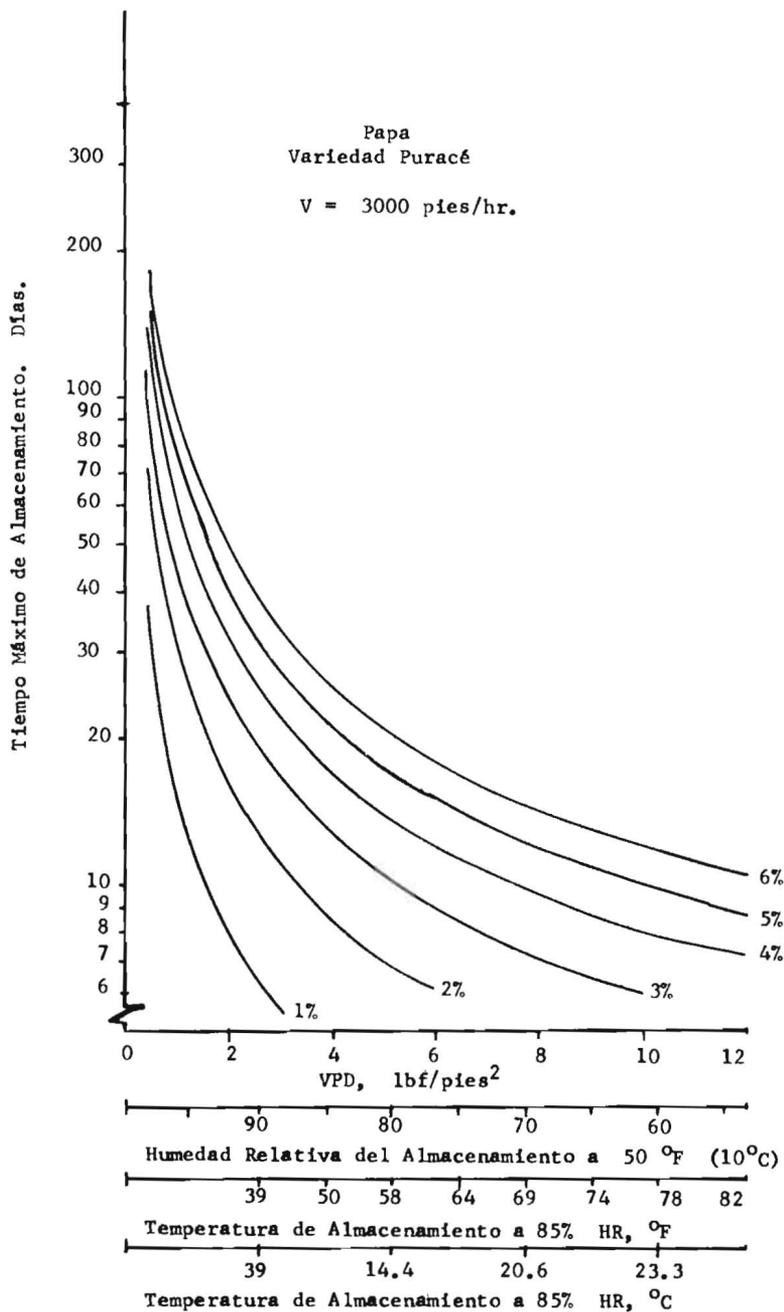


Figura 12.— Tiempo Máximo de Almacenamiento de Papa Puracé.
 $V = 3000$ pies/hr.

Cambios en la humedad relativa del almacenamiento afectan en forma dramática el tiempo de duración del producto. Un 5% de pérdida de peso ocurrirá en 90 días a un 95% de humedad relativa, 50°F (10°C) y 1500 pies/hr. Si ocurre un 5% de decrecimiento en la humedad relativa (de 95% a 90%) la misma pérdida ocurrirá en sólo 45 días bajo las mismas condiciones de temperatura y velocidad del aire.

Por otra parte, un cambio de 5°F (de 50 a 55°F) durante el almacenamiento de esta variedad a 85% HR y 1500 pies/hr.) resultará en una reducción del tiempo de sólo 6 días.

5.3.2. *Variedad Capiro:*

En las Figuras 13, 14 y 15 se presentan los gráficos para predecir pérdidas de peso y tiempo máximo de almacenamiento para la variedad Capiro.

Al analizar los gráficos en forma semejante al caso de la variedad Puracé, se puede concluir que la humedad relativa es igualmente la variable más crítica en relación con la pérdida de peso de la variedad Capiro. Pequeñas disminuciones en la humedad relativa resultan en una drástica reducción del tiempo de almacenamiento. Por otro lado, aumentos en temperatura, aunque de importancia en cuanto a su contribución al incremento del déficit de presión de vapor, contribuyen en menor magnitud a las pérdidas. Finalmente la velocidad del aire ambiental tiene un efecto secundario en el almacenamiento de esta variedad.

5.3.3. *Posibilidades y Limitaciones del Uso del Aire Ambiental para el Almacenamiento de la Papa Puracé y Capiro:*

Con base en los gráficos desarrollados para las variedades estudiadas, se pueden analizar las posibilidades y limitaciones que presenta el uso del aire ambiental para su almacenamiento. El estudio que aquí se presenta, parte de la consideración de que es posible mantener una temperatura de 50°F (10°C) dentro del almacenamiento, forzando el aire natural por medio de un ventilador durante convenientes períodos del día (el aire nocturno, por ejemplo). Análisis a otras temperaturas puede hacerse en la misma forma.

En primer término es necesario observar que la variedad Puracé pierde considerablemente más peso que la variedad Capiro, bajo las mismas condiciones de almacenamiento. Es así como, a una temperatura de 50°F (10°C), una humedad del 90% y una velocidad del aire de 1500 pies/hr. la variedad Capiro puede durar 260 días (Figura 14), antes de perder un 5% de su peso, mientras la misma reducción de peso bajo las condiciones especificadas ocurre en sólo 45 días en la papa Puracé (Figura 11). Por lo tanto, la papa Capiro presenta mejores posibilidades de almacenamiento prolongado que la variedad Puracé.

Humidificación del aire a una temperatura de 50°F (10°C) no es necesaria en el caso del almacenamiento de la papa Capiro, a menos que se aspira conservar el producto por períodos muy largos. Es así como, para conservar la papa por períodos de 3 meses, la humedad puede disminuir hasta un 75%, manteniéndose las pérdidas por debajo del 5%. Humidificación se requeriría, sólo en casos en los cuales se desee conservar el producto por períodos superiores a 6 meses.

Para el almacenamiento de la variedad Puracé a una temperatura de 50°F (10°C) se hace necesario mantener una alta humedad relativa. Para períodos de 3 meses, por ejemplo, son necesarias humedades superiores al 95%. Almacenamientos a estas condiciones de temperatura, por períodos superiores a los 3 meses, traerían como consecuencia altas pérdidas de peso en el producto.

El anterior es apenas un ejemplo del tipo de análisis que puede efectuarse a partir de los gráficos desarrollados. Existe un amplio campo de estudio sobre las posibilidades y limitaciones que presentan las condiciones ambientales de las zonas de producción en el país para el almacenamiento del producto. Estos estudios pueden efectuarse en base a los registros climatológicos de tales zonas aplicados a los gráficos desarrollados.

VI. CONCLUSIONES

El modelo matemático desarrollado por Villa (1973) puede simplificarse para el estudio de pérdidas de peso de las variedades de papa Puracé y Capiro. Dicha simplificación es posible debido a que las áreas de la corteza de estas variedades que se comportan como "superficies libres" son de naturaleza despreciable ($\gamma_1 = 0$). El modelo simplificado y linealizado queda reducido a la siguiente ecuación:

$$\frac{1}{h_d} = \frac{R_0 T}{M D_{wa}} \left(\frac{r\delta}{\gamma_2} \right) + \left(\frac{R_0 T}{M \gamma_2} \right) \left(\frac{1}{h_d} \right) \quad (16)$$

El modelo matemático descrito por la Ecuación (16) sirve para determinar los parámetros γ_2 y $r\delta$, que constituyen características del producto, y para estudios de predicción de pérdida de peso y tiempo máximo de duración a condición de almacenamiento dadas, una vez se conozcan los parámetros.

Para utilizar el modelo en los dos problemas descritos es necesario conocer el área superficial de cada partícula individual. Para las variedades Puracé y Capiro existen convenientes relaciones entre el peso de la partícula y su área superficial. Dichas relaciones son:

$$\text{Variedad Puracé: } A = 0,31422 W_0^{0,63860} \quad (14)$$

$$\text{Variedad Capiro: } A = 0,28613 W_0^{0,56545} \quad (15)$$

Para determinar los parámetros γ_2 y $r\delta$ es necesario efectuar una serie de experimentos de pérdida de peso en partículas individuales a condiciones de almacenamiento controladas.

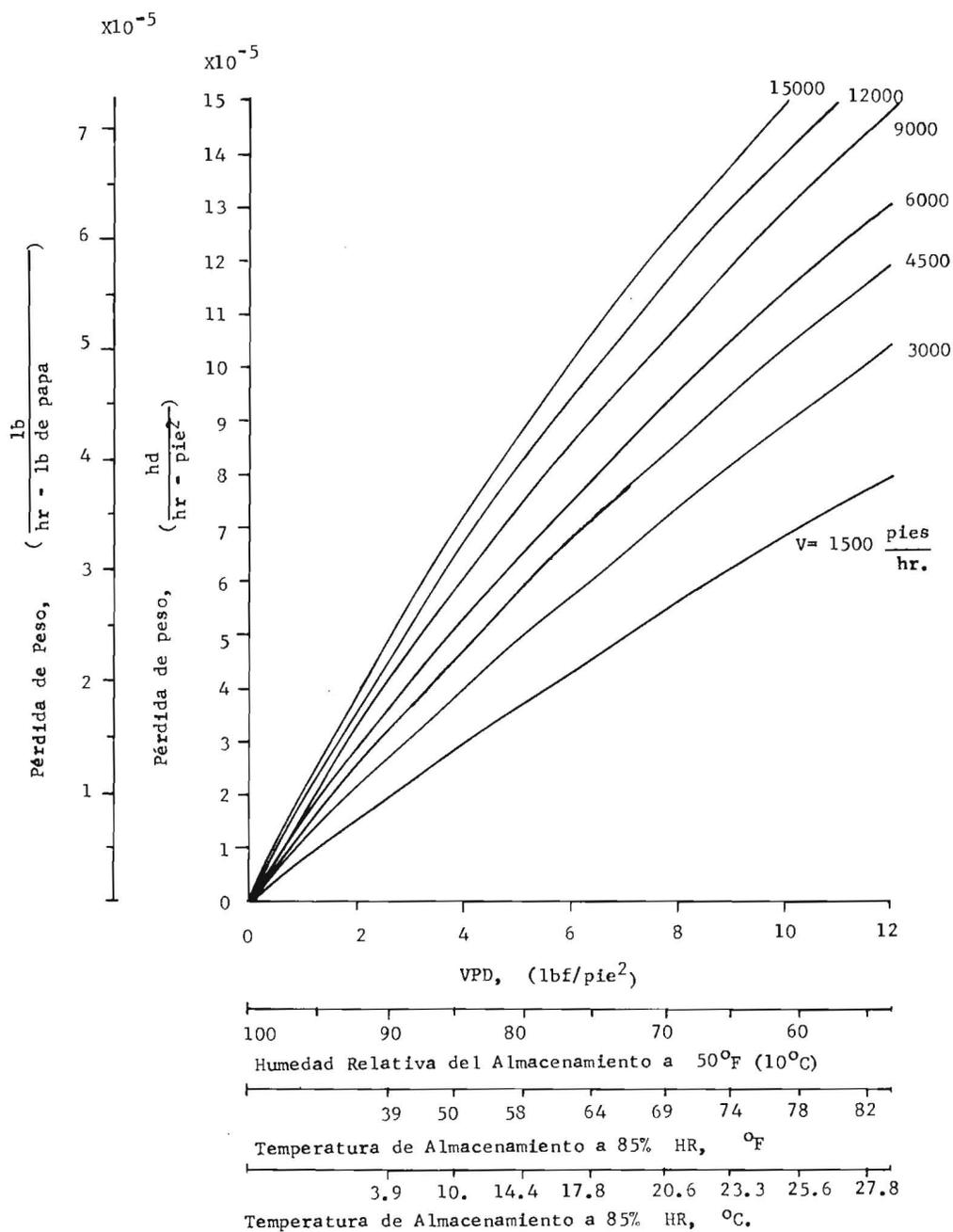


Figura 13.— Predicción de Pérdida de Peso en Papa Capiro a Diferentes Condiciones de Almacenamiento.

Al realizar pruebas a una temperatura de 70°F y 50% (26 lb/pie² de VPD), a velocidades del aire entre 1.500 y 9.000 pies/hr. para 16 muestras de cada variedad se encontraron los siguientes valores para los parámetros γ_2 y $r\delta$:

$$\begin{aligned}\text{Variedad Puracé: } \gamma_2 &= 0,04266 \\ r\delta &= 0,12362 \text{ pies}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Variedad Capiro: } \gamma_2 &= 0,009007 \\ r\delta &= 0,011089 \text{ pies}\end{aligned}$$

Expresado en términos físicos lo anterior significa que el 95.7% de la corteza de la papa Puracé y el 99.0% de la corteza de la papa Capiro son impermeables al paso del vapor de agua, comportándose el resto del área como membranas permeables.

Al efectuar pruebas a condiciones variables de almacenamiento, en un rango de déficit de presión de vapor entre 6 y 26 lb/pie² y una velocidad de 6.000 pies/hr. se encontró que el parámetro $r\delta$ es función del déficit de presión de vapor. El análisis realizado en 28 muestras de cada variedad dió las siguientes relaciones entre $r\delta$ y VPD:

$$\text{Variedad Puracé: } r\delta = 0,001145 + (0,000479) \text{ VPD} \quad (17)$$

$$\text{Variedad Capiro: } r\delta = 0,003082 + (0,0003119) \text{ VPD} \quad (18)$$

Gráficos de predicción de pérdida de peso y tiempo máximo de almacenamiento, a diferentes condiciones, para las dos variedades estudiadas, pueden desarrollarse al aplicar los parámetros determinados experimentalmente, al modelo simplificado. Con tales gráficos es posible estudiar el efecto de cada variable sobre la pérdida de peso y las posibilidades y limitaciones del uso de condiciones ambientales naturales para almacenar el producto.

Al analizar los gráficos de predicción se concluyó que la humedad relativa es la variable más crítica en el almacenamiento de la papa Capiro y Puracé. Pequeñas disminuciones en la humedad relativa resultan en una drástica reducción del tiempo de almacenamiento. La temperatura, aunque importante en cuanto a su contribución en el aumento del déficit de presión de vapor, tiene una influencia comparativamente menor que la humedad relativa. La velocidad del aire afecta en forma secundaria al fenómeno de pérdida de peso.

Por otra parte, se encontró que la variedad Puracé pierde considerablemente más peso que la variedad Capiro bajo las mismas condiciones de almacenamiento. Por ello, la variedad Capiro presenta mejores posibilidades para almacenamientos prolongados.

Partiendo de la base de una temperatura de almacenamiento de 50°C (10°C) y una velocidad de 1500 pies/hr. no se requiere humificación del aire para el almacenamiento de papa Capiro a menos que se busque conservar el producto por períodos superiores a 6 meses. En el caso de la papa Puracé es necesario mantener una alta humedad relativa (del orden del 95%) si se desea almacenarla por períodos de 3 meses.

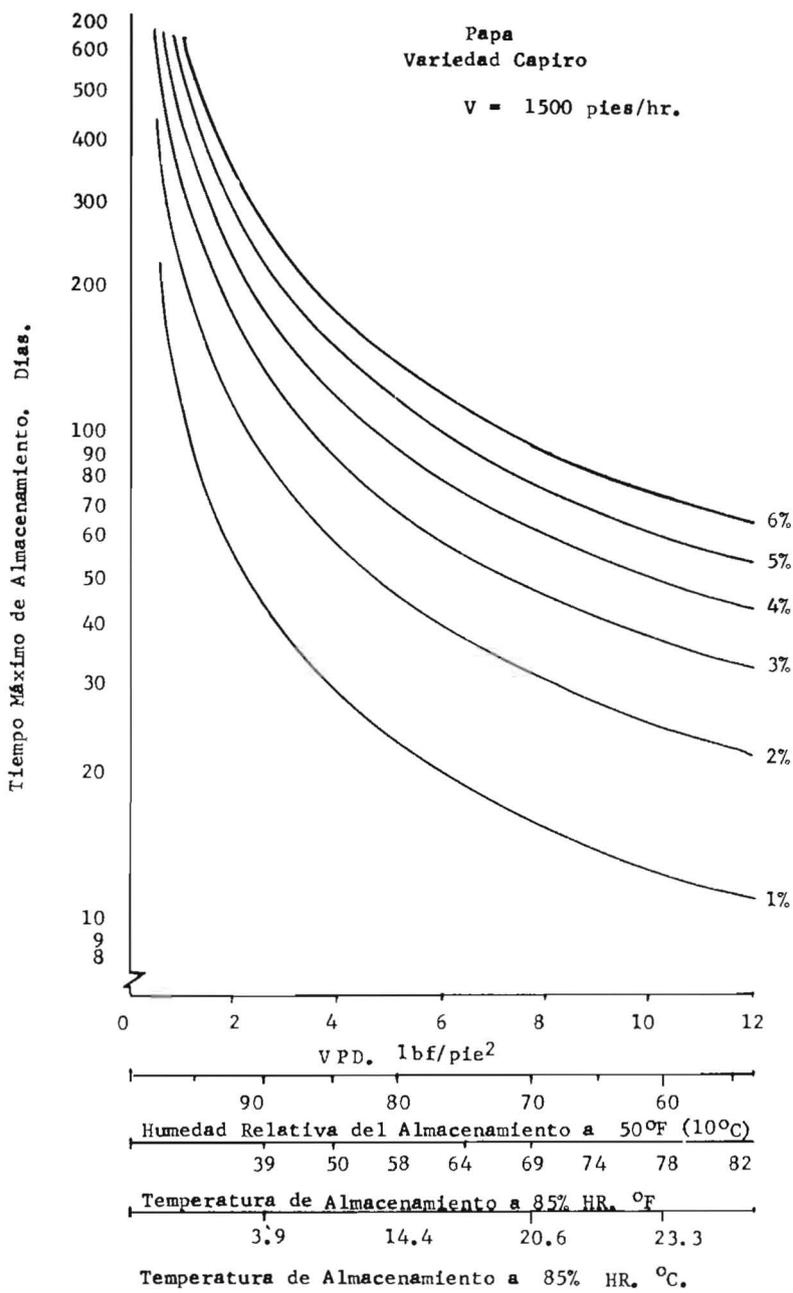


Figura 14.- Tiempo Máximo de Almacenamiento de Papa Capiro.
V = 1500 pies/hr.

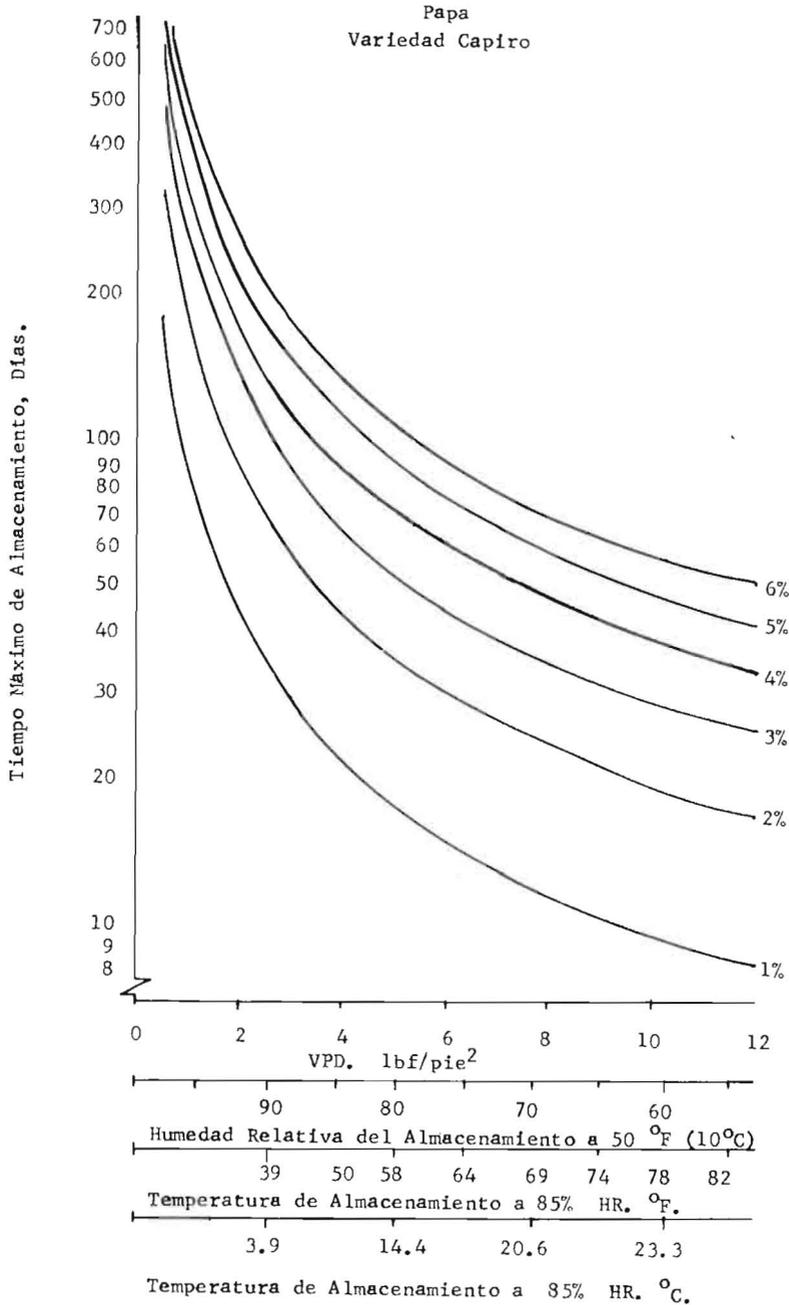


Figura 15.— Tiempo Máximo de Almacenamiento de Papa Capiro.
V = 3000 pies/hr.

Los gráficos desarrollados tienen un amplio campo de aplicación en el estudio de las posibilidades y limitaciones de las condiciones de las zonas de producción en el país para el almacenamiento de la papa. Estos estudios pueden efectuarse en base a los registros climatológicos de tales zonas.

BIBLIOGRAFIA

- Beck, J. V. 1973. Parameter estimation in engineering and science. Mechanical Engineering Department, Michigan State University. Preliminary Edition.
- Burg, S. P. and E. A. Burg. 1965. Gas exchange in fruits. *Physiologia Plantarum* 18: 870 - 884.
- Burton, W. C. 1966. The potato, Veenman y Zonen, Wageningen, Holland.
- Butchbaker, A. F. 1970. A method for determining the moisture loss from biological products. ASAE Paper N° 70 - 542.
- Fockens, F. H. 1967. Transport phenomena during cooling down of horticultural products. En holandés con resumen en inglés. Tesis no publicada de Ph. D. Technological University, Delft, Holanda.
- Gac, A. 1956. Influence of the relative humidity of air on the loss weight of harvested fruits during storage and ripening. 9th International Cong. Refrig. Proc. 2: 401 -4018.
- Lentz, C. P. 1971. Moisture loss of potatoes in refrigerated storage. *Canadian Journal of Food Science* 20: 373 -378.
- Lutz, J. M. 1968. The commercial storage of fruits, vegetable and florist and nursery stocks. *Agricultural Handbook N° 66 U. S. D. A.*
- Mitchell, F. G.; L. Guillou and R. A. Parson 1972. Commercial cooling of fruits and vegetables. *California Agricultural Experimental Station, Manual 43, 44 p.*
- Schippers, P. A. 1971. The relation between storage and changes in weight and specific gravity of potatoes. *Amer. Pot. Journal* 48: 313 -319.
- Van Arsdol, W. B. and M. J. Copley. 1963. Food dehydration. Vol. I. Principles AVI Pu Co., Inc. Westport, Connecticut, U. S. A.
- Villa, L. G. 1973. Single particle convective moisture losses of horticultural products in storage. Ph. D. Thesis. Agricultural Engineering Department, Michigan State University. U. S. A.

APENDICE A

Tabla de Conversión de Unidades Inglesas al Sistema SI.

Cantidad	Unidad Inglesa	Unidad SI	Multiplicar la Unidad Inglesa por Para Obtener la SI
Longitud	Pie	Metro	$3,048 \times 10^{-1}$
Area	Pie Cuadrado	Metro Cuadrado	$9,290 \times 10^{-2}$
Volumen	Pie Cúbico	Metro Cúbico	$2,832 \times 10^{-2}$
Tiempo	Hora	Segundo	$3,600 \times 10^{-3}$
Velocidad	Pies/Hr.	Metro/Segundo	$8,467 \times 10^{-5}$
Masa	Libra Masa	Kilogramo	$4,536 \times 10^{-1}$
Fuerza	Libra Fuerza	Newton	4,448
Energía (calor)	BTU	Joule	$1,055 \times 10^{-3}$
Presión	Libra fuerza/Pie ²	Newton/Metro ²	$4,788 \times 10$
Temperatura	°F	°C	$^{\circ}\text{C} = 5/9(^{\circ}\text{F} - 32)$