

10 300627
2ej



UNIVERSIDAD LA SALLE

ESCUELA DE QUIMICA
INCORPORADA A LA U.N.A.M.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

**"CARACTERIZACION FISICA E HIDRODINAMICA DE LA
FLUIDIZACION DEL CAFE PERGAMINO *Coffea arabica* L.
DE TRES REGIONES PRODUCTORAS MEXICANAS, EN UN
EQUIPO PILOTO."**

TESIS PROFESIONAL

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

QUIMICO FARMACEUTICO BIOLOGO

P R E S E N T A :

CLAUDIA OCHOA MILLAN

DIRECTOR DE TESIS:

Q. IRENE MONTALVO VELARDE



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Este trabajo se realizó en el laboratorio del Departamento de Graduados e Investigación en Alimentos de la Escuela Nacional de Ciencias Biológicas del Instituto Politécnico Nacional bajo la dirección de la M. en C. Irasema Anaya Sosa como parte del proyecto: Conservación de Semillas del Trópico Húmedo. Clave 862551; financiado por D.E.P.I.- I.P.N.

CONTENIDO

	Página
Indice de cuadros	i
Indice de figuras	ii
Nomenclatura	iii
1. Introducción	1
2. Objetivos	
2.1 Objetivo general	6
2.2 Objetivos particulares	6
3. Generalidades	
3.1 Café	7
3.1.1 Descripción del fruto del cafeto	8
3.1.2 Tecnología de los cafés verdes	9
3.1.3 Beneficio humedo	11
3.1.4 Beneficio seco	15
3.2 Fluidización	16
3.2.1 Ventajas y desventajas de los lechos fluidizados	17
3.2.2 El fenómeno de la fluidización	18
3.2.3 Comportamiento hidrodinámico de un lecho empacado	18
3.2.4 Parametros que caracterizan la fluidización	23
3.2.5 Tipos de fluidización	24
4. Desarrollo experimental	29

5. Materiales y metodos.

5.1 Materiales	32
5.1.1 Materia prima	32
5.1.2 Equipo de laboratorio	32
5.2 Metodos	35
5.2.1 Caracterización física y química del material de prueba .	35
5.2.1.1 Volumen medio unitario	35
5.2.1.2 Dimensiones de la partícula	35
5.2.1.3 Diámetro equivalente	35
5.2.1.4 Densidad aparente promedio	36
5.2.1.5 Contenido de humedad	36
5.2.1.6 Esfericidad media	36
5.2.2 Evaluación de los parametros de fluidización	37
5.2.2.1 Densidad del aire	37
5.2.2.2 Porosidad del lecho	37
5.2.3 Determinación de la caída de presión respecto a la velocidad superficial del aire	38
5.2.3.1 Determinación de la caída de presión provocada por el distribuidor de aire.....	38
5.2.3.2 Determinación de la caída de presión provocada por el lecho empacado y fluidizado	38
5.2.3.3 Cálculo de la velocidad mínima de fluidización	39
6. Resultados y Discusión	
6.1 Propiedades físicas del material	40
6.1.1 Volumen medio unitario	40
6.1.2 Dimensiones de la partícula	40
6.1.3 Diámetro equivalente	40

6.1.4 Densidad aparente promedio	40
6.1.5 Contenido de humedad	41
6.1.6 Esfericidad media	41
6.2 Características hidrodinámicas	42
6.2.1 Densidad del aire	42
6.2.2 Velocidad mínima de fluidización y caída de presión	42
6.2.3 Ecuación de Ergun y porosidad	43
6.2.4 Número de Reynolds y número de Froude	43
7. Conclusiones	84
8. Bibliografía	86

INDICE DE CUADROS Y FIGURAS.

Cuadro 1. Exportaciones de café para 1988	2
Cuadro 2. Superficie y producción nacional de café 88/89	3
Cuadro 3. Velocidad mínima de fluidización experimental	82
Cuadro 4. Características hidrodinámicas	83
Cuadro 5. Números adimensionales	83
Cuadro 6. Análisis estadístico	84
Figura 1. Partes componentes del fruto del cafeto	10
Figura 2. Beneficio del café	12
Figura 3. El fenómeno de la fluidización	19
Figura 4. Variación de la caída de presión con respecto a la velocidad superficial del fluido en lecho fluidizado	22
Figura 5. Desarrollo experimental	30
Figura 6. Secador de lecho fluidizado para vegetales	33
Gráfica 1. Perfil hidrodinámico. CAS7	45
Gráfica 2. Perfil hidrodinámico. CAS7R	46
Gráfica 3. Perfil hidrodinámico. CAH7	47
Gráfica 4. Perfil hidrodinámico. CAH7R	48
Gráfica 5. Perfil hidrodinámico. CAS10	49
Gráfica 6. Perfil hidrodinámico. CAS10R	50
Gráfica 7. Perfil hidrodinámico. CAH10	51
Gráfica 8. Perfil hidrodinámico. CAH10R	52
Gráfica 9. Perfil hidrodinámico. CAS13	53
Gráfica 10. Perfil hidrodinámico. CAS13R	54

Gráfica 11. Perfil hidrodinámico. CAH13.....	55
Gráfica 12. Perfil hidrodinámico. CAH13R	56
Gráfica 13. Perfil hidrodinámico. CHS7	57
Gráfica 14. Perfil hidrodinámico. CHS7R	58
Gráfica 15. Perfil hidrodinámico. CHH7	59
Gráfica 16. Perfil hidrodinámico. CHH7R	60
Gráfica 17. Perfil hidrodinámico. CHS10	61
Gráfica 18. Perfil hidrodinámico. CHS10R	62
Gráfica 19. Perfil hidrodinámico. CHH10	63
Gráfica 20. Perfil hidrodinámico. CHH10R	64
Gráfica 21. Perfil hidrodinámico. CHS13	65
Gráfica 22. Perfil hidrodinámico. CHS13R	66
Gráfica 23. Perfil hidrodinámico. CHH13	67
Gráfica 24. Perfil hidrodinámico. CHH13R	68
Gráfica 25. Perfil hidrodinámico. CXS7	69
Gráfica 26. Perfil hidrodinámico. CXS7R	70
Gráfica 27. Perfil hidrodinámico. CXH7	71
Gráfica 28. Perfil hidrodinámico. CXH7R	72
Gráfica 29. Perfil hidrodinámico. CXS10	73
Gráfica 30. Perfil hidrodinámico. CXS10R	74
Gráfica 31. Perfil hidrodinámico. CXH10	75
Gráfica 32. Perfil hidrodinámico. CXH10R	76
Gráfica 33. Perfil hidrodinámico. CXS13	77
Gráfica 34. Perfil hidrodinámico. CXS13R	78
Gráfica 35. Perfil hidrodinámico. CXH13	79
Gráfica 36. Perfil hidrodinámico. CXH13R	80

a	intercepción más larga
At	area de transferencia
b	intercepción más larga y normal a "a"
c	intercepción más larga y normal a "a" y "b"
$\frac{dp}{dp}$	diámetro de partícula
$\frac{dp}{dp}$	diámetro de partícula promedio.
Fr	número de Froude
g	aceleración de la gravedad
gc	factor de conversión ($Kg_m / Kg_f s^2$)
H	humedad
L	altura del lecho empacado
Lmf	altura de lecho empacado en la condición mínima de fluidización
Ma	peso molecular el agua
Mb	peso molecular del aire
N Re	número de Reynolds
P atm	presión atmosférica
qq/ha	quintales por hectárea
r	radio
Tbs	temperatura de bulbo seco del aire
V	volumen medio unitario
Vm	volumen específico húmedo del aire
Vmf	velocidad mínima de fluidización
Vo	velocidad superficial del aire

Δp	caída de presión
μ	viscosidad
ϵ	porosidad
ϵ_{mf}	porosidad en la condición mínima de fluidización
ρ_f	densidad del fluido
ρ_g	densidad del gas
ρ_s	densidad del sólido
σ	esfericidad de la partícula
σ_s	esfericidad media

CAPITULO 1.

1. INTRODUCCION.

En México, el café es, en la actualidad el primer producto agrícola de exportación (30). Para 1988 las exportaciones fueron de 239.2 millones de dólares, lo cual representa el 38% de la divisas que ingresan al país por concepto de agricultura y silvicultura. Por otra parte, para ese mismo año fue el cuarto producto de exportación después del petróleo crudo, automóviles para el transporte de personas y motores automotrices (27). En el cuadro 1 se muestra el destino principal del café oro mexicano, su volumen y su precio.

En el país existen plantaciones por cerca de 650 000 ha, como puede observarse en el cuadro 2. Los estados productores más importantes son Chiapas, Oaxaca, Veracruz y Puebla, la media nacional es de 10.1 quintales por hectárea cuadrada (qq/ha), resaltando los estados de Puebla, Veracruz y Chiapas por su mayor rendimiento. Cabe señalar que existen en el estado de Puebla sistemas de plantación que alcanzan rendimientos de 80 qq/ha, es decir, casi un 800% superior a la media nacional (30).

Par resaltar la importancia que tiene el cultivo en la generación de empleos y considerando que la producción de un saco de café oro de 60 Kg se requiere de 16 jornales/hombre, además evaluando 5 cosechas, se llega a la conclusión de que esta actividad ocupó 66 millones de jornales al año, lo que significa aproximadamente el 9.0% de la fuerza de trabajo ocupada en la agricultura en 1988 (30).

La especie de café que más se cultiva en México es la de

Cuadro 1. EXPORTACIONES DE CAFE PARA 1988.

PAIS	VOL. COMERCIAL	VOLUMEN	PRECIO
	U.S.-DLLS (10 ⁶)	Kg (10 ⁶)	U.S.-DLLS
E.U.A.	162	57	2.83
REP.FED.A.	109	39	2.80
SUIZA	19	7	2.81
JAPON	18	6	2.88
PANAMA	10	4	2.85

**SISTEMA DE ESTADISTICAS DE COMERCIO EXTERIOR.
INFORMACION DE EXPORTACIONES DE 1988. SECOFI**

Cuadro 2. SUPERFICIE Y PRODUCCION NACIONAL DE CAFE 88/89.

ESTADO	SUPERFICIE (%)	PRODUCCION (%)	RENDIMIENTO (qq/a)
CHIAPAS	25.4	33.1	13.3
VERACRUZ	20.0	29.7	15.2
OAXACA	23.5	11.8	5.1
PUEBLA	7.9	14.0	18.1
GUERRERO	6.3	4.4	7.1
HIDALGO	9.5	2.4	2.6
S.L.P.	5.1	1.6	3.2
NAYARIT	2.3	2.4	10.3

INMECAFE. NOVIEMBRE DE 1989; SEGUN AGROSINTESIS 1987.

Coffea arabica L., aportando un 95 % de la producción nacional (6). La variedad predominante es la típica o criolla, aún cuando los productores tienen más de una variedad. Según una encuesta realizada por el centro de Ecodesarrollo en 1985, el 81% de los productores tenían esa variedad, el 38% Bourbon, 20% Caturra, 27% Mundo novo, y 15% Caturra amarillo. Por regiones estas proporciones varían: en la sierra de Puebla, Típica 98.3% y Bourbon 56.9%; Córdoba, 95.0% Típica, Bourbon 56.9% y Mundo novo 36.7% (20).

En relación con la cosecha, ésta se presenta en forma escalonada, en el período que va de octubre a febrero (30).

La cereza de café, debe pasar por un beneficio a fin de quedar en condiciones de ser consumida. El principal problema del beneficio es el secado, el cual constituye en muchos casos el principal "cuello de botella", ya que dicho proceso debe realizarse a velocidades relativamente lentas a fin de no afectar los atributos de calidad del grano, principalmente el sabor, el color, y el aroma del café oro. (14)

Por lo anterior, se han propuesto nuevas tecnologías de secado, como podría ser el secado en lecho fluidizado. Para llevar a cabo el estudio de secado de café en lecho fluidizado, es muy importante evaluar las características hidrodinámicas que lleven al establecimiento adecuado de la velocidad de aire mínima para fluidizar el producto. El conocimiento de este valor de velocidad es fundamental para el proceso mismo, debido a que es un parámetro de diseño y sobre de él se evalúan las velocidades en la operación de secado.

Para evaluar dichas características se requiere definir el producto a secar, la forma (geometría) y tamaño de los granos y en seguida las condiciones (variables) a las cuales se van a efectuar los experimentos. Para el presente estudio se ha escogido el café oreado, de 3 regiones productoras del país como son Atoyac, Gro., Huatusco, Ver., y Xicotepéc, Pue.

CAPITULO 2.

2. OBJETIVOS.

2.1 OBJETIVO GENERAL.

2.1.1. Caracterizar física e hidrodinamicamente las partículas del café oreado *Coffea arábica* L. para el fenómeno de fluidización.

2.2. OBJETIVOS PARTICULARES.

2.2.1. Evaluar las características físicas relevantes involucradas en el fenómeno de la fluidización.

2.2.2. Calcular el valor de la velocidad mínima de fluidización.

2.2.3. Obtener el patrón de fluidización que presenta el café oreado.

2.2.4. Evaluar la validez de la ecuación de Ergün para la predicción del valor de la velocidad mínima de fluidización en el caso del café oreado *Coffea arábica* L.

3. GENERALIDADES.

3.1. CAFE.

El café es la semilla proveniente del fruto del cafeto, el cual pertenece a la familia Rubiaceae, género *Coffea*, subgénero *Coffea* (30).

El cafeto se cultiva en climas tropicales, requiere de un ambiente húmedo y de tierras ricas en minerales. Es un árbol siempre cubierto de hojas pulidas de color verde oscuro, del cual brotan flores blancas, semejantes al jazmín. Se alza hasta unos 10 metros, pero se le mantiene podado a no más de 3 ó 4 metros para facilitar la recolección de los granos. Da fruto a los tres años y rinden de 1 a 3 kilos durante 30 ó 50 años, y sus cosechas se repiten cada 4 ó 5 meses. Hay cafetos que producen durante un siglo (32).

Entre las diferentes especies de cafetos las de mayor importancia son: *Coffea arábica* L. y *Coffea canephora* P. (6).

La especie que más se cultiva en México es la de *Coffea arábica* L. (6), cuyas principales variedades son (21) :

- Arábica (*typica* Cramer) : Se le conoce también con los nombres de árabe, *typica*, y criolla. Es originaria de Etiopía.
- Magarogyte : Esta variedad procede de Brasil, es una mutación proveniente de la variedad *typica*. Se encuentra en el estado de Chiapas. Es de baja producción, se muestra muy sensible a la sequía; su cultivo decrece anualmente. Sin embargo, tiene características de sabor muy apreciadas y se cotiza a precios más elevados que la *typica*.

- Bourbon : Originaria de la Isla Reunión, en el sur de Africa. Es mucho más resistente al sol y a los vientos, por lo que se ha incrementado mucho su cultivo, ya que es más productiva.

- Caturra : Nativa del Brasil, corresponde a una mutación de la variedad bourbon. Es de alta producción, resistente a la insolación directa, el viento y el frío; Sin embargo, es exigente en agua y nutrimentos.

- Mundo Novo : Tuvo su origen en Brasil, donde se produjo por cruzamiento natural de la variedad typica, progenie sumatra y la variedad bourbon. Tolera bien la sequía y cuenta con gran poder de recuperación, da buena producción y granos de calidad.

- Gárnica : Es el primer híbrido originado en México, mediante el cruzamiento de mundo novo 15 de color rojo y caturra amarilla 13. Las progenies seleccionadas reúnen las ventajas de los progenitores, no poseen sus inconvenientes, y son más productivas.

Por otro lado la *Coffea canephora*, es una especie cuyo cultivo se desarrolla en las zonas bajas de México a muy poca escala. Su producción se destina principalmente a la preparación de café soluble. Proporciona un fruto pequeño, redondeado de 6 a 8 mm de longitud. La variedad más importante de este café es la robusta, que es una planta mucho más grande que la arábica, es de mayor producción, pero de frutos más pequeños y de calidad inferior (21).

3.1.1 DESCRIPCION DEL FRUTO DEL CAFETO.

Las partes del fruto del cafeto son las siguientes (6) :

a) Epicarpio: Es la capa externa del fruto, su nombre común es pulpa y representa el 43,2% del fruto en base húmeda.

b) Mesocarpio: Esta localizado entre la pulpa y la cáscara del

grano de café, su nombre común es mucilago y representa el 11.8% del fruto en base húmeda.

c) Endocarpio: Es la cascara del grano de café, comúnmente llamado pergamino o pajilla, que es de color amarillo pajizo si ha sido bien lavado y constituye el 6.1% del fruto en base húmeda.

d) Espermodermo: Es una capa muy fina, que se encuentra entre el grano y la pajilla, su nombre común es película plateada y constituye en forma aproximada de un 0.3 a 0.5 % del fruto en base húmeda.

e) Endospermo: Es el grano o semilla del café, comúnmente llamado café verde o café oro y constituye el 38.9 y 55.4% del fruto en base húmeda y base seca respectivamente.

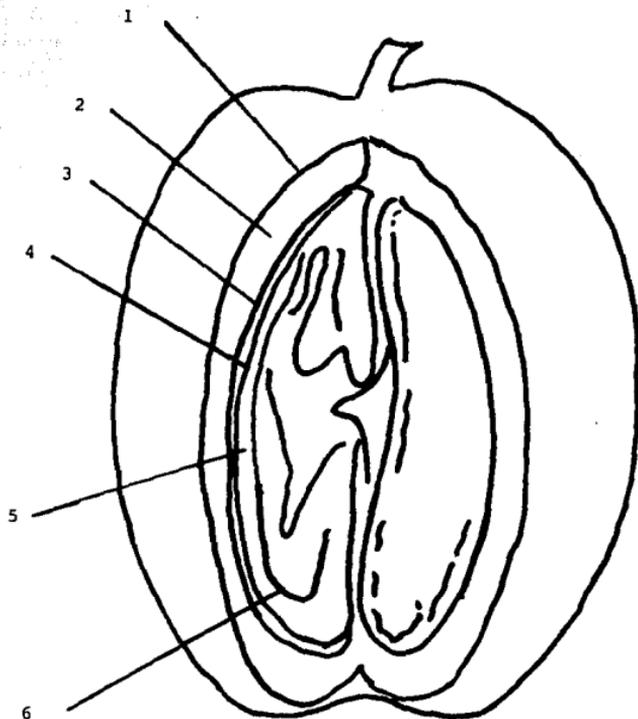
El grano de café tiene una forma hemiesférica, hemielíptica, semiovoide, su sección transversal es por lo tanto plano convexa, tiene un profundo zurco longitudinal, situado en su cara plana. Si se secciona el grano transversalmente, se comprueba que no es únicamente superficial, sino que es una hendidura que se prolonga hasta el interior.

En la figura 1. se muestra un diagrama de la estructura del café cereza y del grano del café (9).

3.1.2 TECNOLOGIA DE LOS CAFES VERDES.

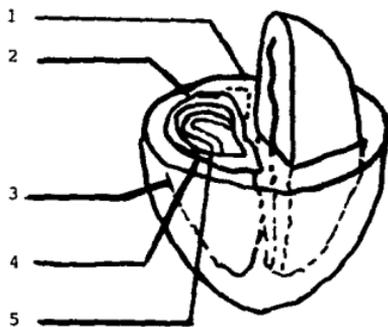
La cereza del café en su estado maduro tiene un color rojo púrpura, este momento es el adecuado para su recolección. Inmediatamente después es sometido al proceso de la transformación o industrialización hasta la obtención de un producto estable de características propias y eminentemente comercial conocido como café oro o café verde (6).

Figura 1. PARTES COMPONENTES DEL FRUTO DEL CAFETO.



CEREZA DEL CAFE.

- 1.- EPICARPIO.
- 2.- MESOCARPIO.
- 3.- ENDOCARPIO.
- 4.- PERISPERMA.
- 5.- ENDOSPERMA.
- 6.- EMBRION.



Existen hasta la fecha dos técnicas o procedimientos para el beneficio del café (30).

El beneficio por la vía húmeda, que consiste en una serie de pasos o etapas conducentes a la obtención de los llamados cafés lavados o suaves.

Con estos procedimientos se obtiene un café de buena calidad, el cual da origen a una bebida de mejor presentación y aroma, así como un sabor más fino y suave a la taza (6).

El beneficio por la vía seca, es más simple y económico que el anterior, conduce a la obtención de los cafés corrientes o del tipo brasileño, que son incuestionablemente de menor calidad que los lavados o suaves (6).

El principal productor de estos cafés es Brasil, el cual además ocupa el primer lugar en la producción mundial de café.

En la figura 2 se muestran los pasos a seguir para el beneficio de café por cada una de las vías.

3.1.3. BENEFICIO HUMEDO (32).

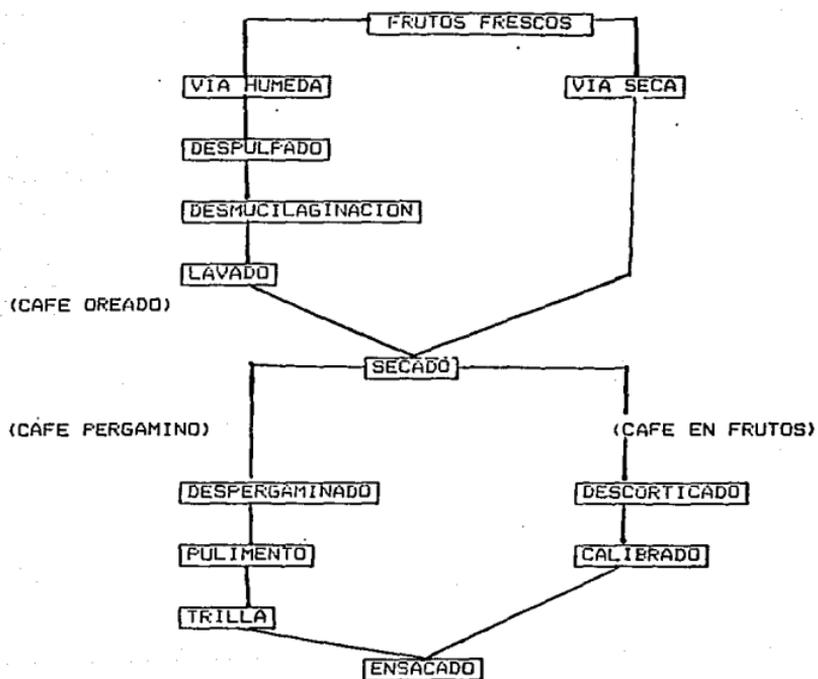
1) Operación de despulpe.- Esta operación consiste en separar los granos de la pulpa.

Para hacer este trabajo se utilizan máquinas despulpadoras o pulperos.

2) Remoción del mucílago.- A la salida de los despulpadores, el café está cubierto todavía de mucílago muy adherido al pergamino. Esta sustancia, rica en pectina y muy higroscópica, es un obstáculo para el secado rápido de los granos. Para separar la sustancia gomosa o mucílago se recurre a la fermentación, o sea el procedimiento natural de solubilización o de digestión de dicha sustancia y el más empleado desde que se inició la técnica del

Figura 1. BENEFICIO DEL CAFE.

- Via Seca (Secado del café cereza)
- Via Humeda (Secado del café pergamino)



(6).

beneficio del café. Sin embargo, en ocasiones se pueden utilizar los siguientes procedimientos :

- a) Acción Bioquímica. (Fermentación)
- b) Acción Química.
- c) Acción Mecánica.
- d) Acciones combinadas: Químico - Mecánicas.

Aparentemente la fermentación es el proceso más sencillo, pero encierra, por decirlo así, la clave o sello del producto final, pues este fenómeno tan usual como desconocido en el fondo, determina en gran parte la aceptación y precios de los cafés en el mercado (32).

3) Lavado.- La operación de lavado, consiste en remover del grano sustancias producidas durante la fermentación, todo esto se lleva a cabo mediante agua corriente durante el tiempo necesario para dejar el grano limpio.

4) Secado.- En los sistemas más comunes de secado para que el café pueda ser embodegado sin riesgo de deterioro o pueda destinarse a un tren de morteadado, es necesario quitarle aproximadamente del 43 al 48% de agua con relación al peso total del café lavado y bien escurrido. Tradicionalmente se utilizan dos tipos de sistema de secado:

4.a.) Secado al Sol.- El más generalizado de los sistemas para secar el café, se realiza en un patio con el nombre de asoleadero o planilla. La operación consiste en exponer el café a los rayos solares directamente en capas delgadas de 5 cm. cuando esta muy humedo, y cada vez más gruesas a medida que progresen en el secado, removiendo dichas capas con un rastrillo de madera.

Si las condiciones del tiempo y del lugar son favorables, es decir, no hay nubosidad o lluvia, entonces el fenómeno físico del secado puede realizarse para las distintas zonas del país como sigue:

- 1.- Zonas bajas (hasta 600 m) 4-6 días.
- 2.- Zonas medias (600 - 1000 m) 6-8 días.
- 3.- Zonas altas (más de 1000 m) 8-10 días.

El contenido de humedad que corresponde al punto de bodega y trilla oscila entre el 12 y 14 %

Sus principales ventajas son:

- a) Su operación es sencilla y por lo tanto no necesita de personas especializadas, con excepción del encargado o "puntero del patio".
- b) La fuente de energía es gratuita
- c) No hay peligro de " arrebar" los cafés. "Arrebar" es secar rápidamente la periferia del grano sin dar oportunidad a su deshidratación uniforme de adentro hacia afuera. Ello motiva la exudación posterior de agua que lo mancha y blanquea.
- d) Un pergamino bien lavado y secado en patio es de muy buena presentación y facilita su comercialización.
- e) Es un sistema propio y recomendable para pequeños beneficios.

Sus principales desventajas son:

- a) Es un sistema muy laborioso para los beneficios de mediana o baja capacidad, es muy tardado y requiere de mucha mano de obra.
 - b) Los beneficios siempre están supeditados a todos los fenómenos meteorológicos de la región.
- 4.b) Secado Artificial.

Este tipo de secado es indispensable en los climas muy lluviosos y cuando el volumen a tratar hace necesaria la

aceleración de las operaciones utilizando un secador tipo guardiola.

Algunas ventajas del secado artificial son:

- a) La operación es programable.
- b) Al ser el proceso más rápido que el secado natural, el tiempo en que se deteriora la calidad mientras el café está húmedo es menor.
- c) La eficiencia del combustible de un secador mecánico oscila entre 40 y 60% comparado contra 7 y 13% obtenidos en un secado al sol.
- d) Se requiere de un menor espacio comparado con las grandes áreas.
- e) La ventaja más importante que tiene sobre el secado al sol es la disminución de la mano de obra.

Principales desventajas:

- a) La fuente de energía es costosa.
- b) Se puede caer en el arrebatamiento de los cafés.

3.1.4. BENEFICIO SECO (30) :

- a) Secado : la cereza como tal se seca con alguno de los métodos arriba señalados.
- b) Decorticación : Una vez que la cereza se ha secado se proceden a eliminar las películas que envuelven al grano.

Las siguientes etapas son comunes a ambos beneficios :

- a) Etapa Preliminar: Consiste en la recepción del café pergamino, pesado, separación de impurezas, y prueba del contenido de humedad (12%).
- b) Trillado : La trilla es la eliminación de la pajilla aún adherida al grano del llamado café pergamino, obteniéndose lo que se conoce como café verde o café oro.

Existen dos métodos para éste propósito, por desgarramiento y por fricción, éste último, tiene la ventaja de pulir simultáneamente el grano.

c) Clasificación y envasado : En esta operación se pretenden formar lotes uniformes de café verde de acuerdo con su forma, tamaño, peso y color.

3.2. FLUIDIZACION.

La fluidización se ha definido como el fenómeno que se presenta al poner en contacto un sólido con un fluido (generalmente un gas) y que bajo ciertas condiciones , el sólido puede adoptar características parecidas a las del fluido, que favorecen en un amplio margen el contacto entre las partículas y el gas, propiciando que los fenómenos asociados de la turbulencia generada (transferencia de calor y masa) se lleven a cabo más eficientemente. El estado de fluidización del sólido se alcanza cuando la velocidad del fluido es tal, que que la fuerza que se transfiere a las partículas sólidas se equilibra en magnitud con la fuerza de gravedad, expandiéndose consecuentemente el lecho (1,8,10,11).

La fluidización se conoce y utiliza en diversas industrias (principalmente en ingeniería química y desecación) desde hace años. En la industria alimentaria, su aplicación ha encontrado diversas dificultades, debido a que los materiales alimenticios presentan diferencias comparadas con otros materiales procesados, tales como su estructura, diámetro, forma de partícula y sensibilidad al calor (23,24).

Los cambios físicos y químicos que ocurren durante el proceso, afectan no solo el comportamiento del sistema durante el proceso en sí, sino también la calidad final del producto (1).

En algunos países se encontraron ya antecedentes de la aplicación de la fluidización en alimentos en operaciones de secado (31), congelación (14), clasificación (5), mezclado (18), transporte (28), y aglomeración (25), pero en todas ellas, por la reciente aplicación al área, no existen estudios básicos disponibles.

3.2.1. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS LECHOS FLUIDIZADOS (1,2,3,10,28).

Como toda operación unitaria, la fluidización tiene ventajas y desventajas, entre las que se encuentran principalmente:

Ventajas:

- a) La velocidad de transferencia de calor y masa entre el gas y las partículas es mayor que las de otros métodos de contacto.
- b) La rapidez de mezclados de los sólidos, es lo que da lugar a condiciones isotérmicas a lo largo de todo el reactor.
- c) Existe un continuo y prolongado contacto partícula - gas.
- d) El flujo de partículas permite operar el sistema de forma continua.
- e) Facilidad en su manejo y control.
- f) Simplicidad en el diseño del equipo.
- g) Bajos costos de operación.

Desventajas:

- a) Cierta tipo de sólidos son pulverizados y arrastrados por el fluido, por lo que deben ser reemplazados.
- b) El rápido mezclado de sólidos, causa tiempos de residencia

poco uniformes en el reactor.

c) Las velocidades de aire deben estar bien coordinadas con las propiedades de los sólidos para obtener resultados adecuados de fluidización.

d) Se presenta erosión en las tuberías y recipientes, debido a la abrasión de los sólidos.

3.2.2. EL FENOMENO DE LA FLUIDIZACION (1,10).

El paso de un fluido a través de un lecho de partículas finas se muestra en la figura 3.

A una velocidad baja, el fluido escasamente se filtra a través de los espacios vacíos entre las partículas estacionarias, a esto se le denomina lecho estacionario. Fig. 3a.

Con un aumento en la velocidad del flujo, las partículas se mueven en la región restringida a este punto se le llama lecho expandido.

A una velocidad todavía mayor, se llega a un punto, en que las partículas se encuentran suspendidas en la corriente fluida, a esto se le denomina fluidización mínima. Fig. 3b.

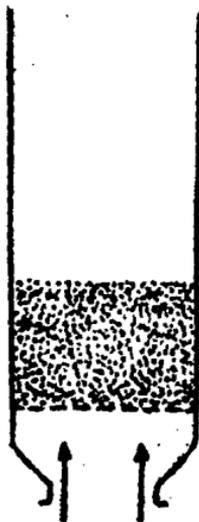
En el caso de que se produzca un incremento en la velocidad de flujo en un lecho a fluidización mínima causa una expansión progresiva de la cama se tendrá un lecho homogéneamente fluidizado que corresponde por lo general a un fluido líquido. Fig. 3c.

Cuando el fluido es un gas, al aumentar la velocidad del fluido en el lecho a fluidización mínima, no continua la expansión de la cama, sino que se observa la formación de burbujas por lo que a este estado se le denomina fluidizado burbujeante, Fig. 3d o de pistones. Fig. 3e.

Si la velocidad de fluido es suficientemente alta, las

Figura 3. EL FENOMENO DE LA FLUIDIZACION.

3a.



GAS

LECHO EMPACADO
O ESTACIONARIO.

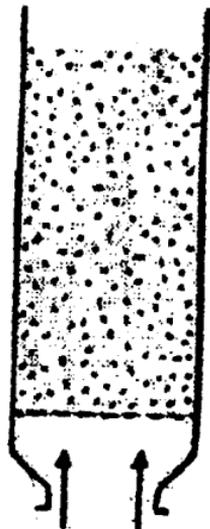
3b.



GAS

FLUIDIZACION
MINIMA.

3c.



LIQUIDO

HOMOGENEAMENTE
FLUIDIZADO.

(11)

Figura 3. EL FENOMENO DE LA FLUIDIZACION.

CONT...

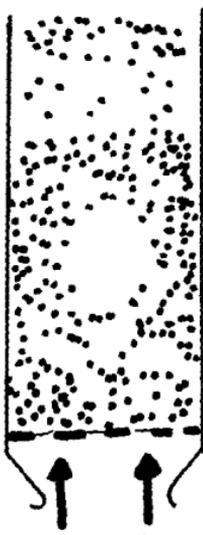
3d.



GAS

LECHO BURBUJEANTE

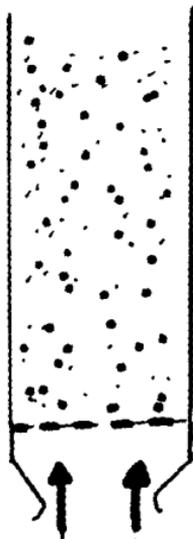
3e.



GAS

LECHO DE PISTONES

3f.



GAS O LIQUIDO

LAVADO

partículas de sólido son arrastradas y entonces se considera que el lecho está en un estado de fluidización con transporte neumático de sólidos., a esto se le llama lavado.

3.2.3. COMPORTAMIENTO HIDRODINAMICO DE UN LECHO EMPACADO.

El comportamiento ideal de la caída de presión de un lecho empacado conforme la velocidad del flujo ascendente se incrementa, como se observa en la figura 4.

Entre los puntos A y B el lecho es estable o estacionario; al llegar al punto B, la caída de presión materialmente balancea el peso de los sólidos. Entre los puntos B y C el lecho es inestable, y las partículas ajustan su posición para presentar la menor resistencia al flujo. El punto C, es referido como el punto mínimo de fluidización y se tiene cuando se presenta el arreglo más suelto entre las partículas para estar en contacto unas con las partículas hasta el punto D, hasta que por último empiezan a ser arrastradas por el fluido, en el punto E (1,11,12).

El comportamiento ideal antes descrito para lechos fluidizados y estáticos, virtualmente es difícil de alcanzar en la práctica por la presencia de múltiples factores que lo afectan (9).

En un lecho empacado las vías que sigue el fluido están constituidas por un sin número de canales paralelos e interconectados, los cuales no tienen un diámetro fijo y siguen diferentes direcciones conforme los sólidos obstruyen esas vías. Estos canales no presentan la misma sección transversal promedio o longitud total, de aquí que el flujo al pasar a través de estos canales se acelere y desacelere repetidamente, experimentando pérdidas consecuentes de energía cinética. Además,

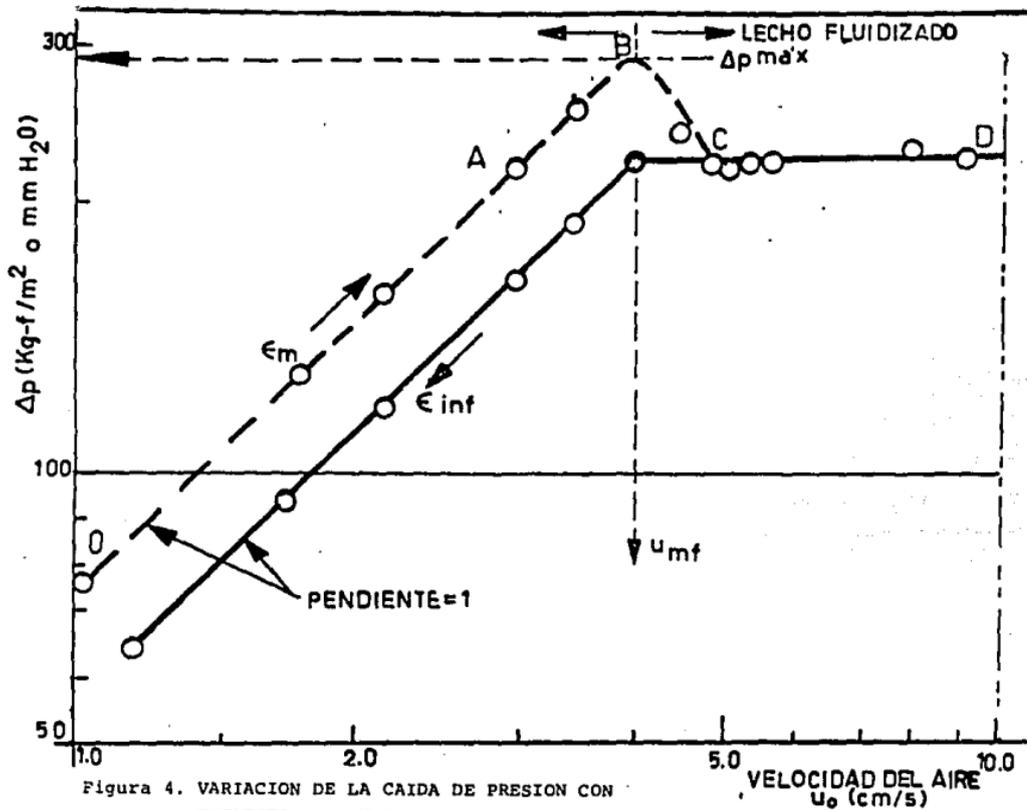


Figura 4. VARIACION DE LA CAIDA DE PRESION CON RESPECTO A LA VELOCIDAD SUPERFICIAL DEL FLUIDO EN LECHO FLUIDIZADO. (11)

la rugosidad de la superficie de los sólidos genera pérdidas por fricción y arrastre de los mismos (9).

En el caso particular de un fluido a través de un lecho empacado por partículas, al estar inmersas estas en la corriente o flujo se origina, en primer término, una fuerza que se opone a la existencia por el movimiento del fluido y, en segundo término, la existencia de dos fuerzas componentes debidas por la presión del fluido y por la superficie de la partícula. Esta situación ha conducido a emplear un número de Reynolds modificado en comparación al manejado con fluidos moviéndose a través de tuberías (15). De esta forma el número de Reynolds (N_{Re}) permite conocer el tipo de régimen del fluido en su paso a través de lechos empacados, expresándose de la siguiente manera:

$$N_{Re} = \frac{d_p V_s \rho_f}{\mu}$$

Ecuación 1.

En un lecho poroso un régimen laminar se presenta para N_{Re} menores que 10; un fluido transicional será el que se presente a N_{Re} entre 10 y 100 y un régimen de turbulencia para valores de N_{Re} mayores de 100.

3.2.4. PARAMETROS QUE CARACTERIZAN LA FLUIDIZACION.

Se ha observado que la caída de presión a través del lecho se ve afectado por las propiedades del material a fluidizar así como por las características del equipo y accesorios involucrados (15).

Los sólidos granulares pueden estar como materiales monodispersos (partículas del mismo tamaño) o polidispersos (partículas de diferente tamaño). El comportamiento de las partículas en el fluido no solo depende de su tamaño, sino también

de su forma y peso. Si la forma es complicada y heterogénea, dificulta el movimiento del fluido a través del lecho y mas dificultad se tiene para caracterizar el fenómeno (12).

Un parámetro fundamental al hablar de lechos fluidizados es la velocidad mínima de fluidización (V_{mf}) la cual es función del tamaño de partícula, de su forma, de su densidad, de la densidad del gas, etc., así como de otros factores que se mencionan a continuación (3) :

- Diámetro equivalente de partícula (d_p), se define como el diámetro que tendría una esfera con el mismo volumen que la partícula. Este diámetro será semejante al diámetro real de la partícula, si ésta es prácticamente esférica, en otro caso el diámetro será sobreestimado.

- Esfericidad (c), es la razón de la superficie de la esfera a la superficie particulada, referidas al mismo volumen. Es evidente a partir de la definición, que los valores que podrá tomar la esfericidad están entre cero y uno.

- Fracción de espacios vacíos (σ), es el cociente entre el volumen vacío y el volumen total de la cama. Debido a que la fracción hueca es difícil de predecir con exactitud, pero fácil de medir, es recomendable obtenerla de forma experimental.

3.2.5. TIPOS DE FLUIDIZACION (4,17).

En general, los lechos fluidizados pueden ser divididos en dos clases, fluidización particulada y fluidización agregativa. En la primera, existe una dispersión uniforme de las partículas en el seno del fluido y el lecho se expande de una manera regular conforme la velocidad del fluido se incrementa. Este comportamiento es llamado "fluidización particulada" y se presenta

en la mayoría de los sistemas sólido - líquido; la única excepción importante se tiene cuando la fase sólida está constituida de finas partículas de alta densidad. Este comportamiento también se presenta en ciertos sistemas gas - sólido justamente en un exceso de la velocidad mínima de fluidización y especialmente cuando las partículas son aproximadamente esféricas y tienen muy bajas velocidades de caída libre. En la fluidización particulada, inicialmente el movimiento de las partículas es relativamente bajo y el fluido se mueve predominantemente en un flujo tipo pistón con regresos de fluido para llevar a cabo mezclado del lecho. Generalmente existe una turbulencia global en el sistema.

En el segundo tipo de fluidización, "fluidización agregativa", dos fases están presentes en el lecho : una fase continua o de emulsión y una fase discontinua o de burbujeo. Este es el modelo normalmente encontrado en un sistema sólido - gas. Las burbujas tienden a formarse a velocidades de gas por arriba de la velocidad mínima de fluidización y crecen conforme van pasando a través del lecho. Las burbujas crecen debido a que la presión hidrostática cae subitamente como resultado de la coalescencia de otras burbujas y por el flujo de gas de una fase continua a una de burbujeo. Si la velocidad de ascensión de la burbuja excede a la velocidad de caída libre de la partículas, la burbuja tenderá a arrastrarlas.

En general, cuando el tamaño de la burbuja excede en 10 diámetros a la partícula, será lo suficientemente visible y entonces se presentará una fluidización agregativa o de burbujeo. De otra manera, la burbuja no será observable presentándose entonces la fluidización particulada. Por ello un modelo de un

lecho que contiene un gran número de burbujas es mucho más complejo.

Como se refirió anteriormente, una de las propiedades más importantes de un lecho fluidizado es su excelente característica de transferencia de calor (4). Para un sistema líquido - sólido, se puede incrementar el coeficiente de transferencia cerca de 2 órdenes de magnitud con respecto al obtenido en un lecho estático, mientras que en un sistema gas - sólido el coeficiente puede alcanzar un factor de 2 a 3. Es decir, una rápida circulación genera un alto coeficiente de transferencia de calor; de aquí la marcada importancia de la fluidización en procesos como secado, congelación, etc.

Se ha encontrado que el tipo de fluidización que presenta un lecho puede ser predecible a través del número de Froude (10).

Este número adimensional es el criterio a seguir para determinar el tipo de fluidización que presenta (agregativa o particulada)

. El número de Froude (f_r) está expresado por la siguiente ecuación (16) :

$$f_r = \frac{V_{mf}}{\sqrt{d_p g}}$$

Ecuación 2.

Cuando el número de Froude en el punto mínimo de fluidización es menor a uno, se presenta una fluidización particulada mientras que cuando este número en el punto mínimo de fluidización es mayor que uno la fluidización es de tipo agregativa.

El uso del número de Froude como criterio de la fluidización no está totalmente comprobado experimentalmente puesto que los casos de la fluidización particulada se estudiaron

con un líquido como fase fluida y para la fluidización agregativa la fase fluida se analizó exclusivamente con gas.

La caída de presión a través de lechos fijos de sólidos de tamaño uniforme ha sido calculada por Ergün, citado por Kunii (11), usando la ecuación :

$$\frac{\Delta p}{L} g_c = 150 \frac{(1 - \epsilon_{mf})}{\epsilon_{mf}^3} \frac{\mu V_s}{(\sigma_s d_p^2)} + 1.75 \frac{1 - \epsilon_{mf}}{\epsilon_{mf}^3} \frac{\rho_g V_s^2}{\sigma_s d_p}$$

Ecuación 3.

Cuando $\epsilon_{mf} = 0.6 - 9.8$, la caída de presión puede ser mucho mayor que la predicha por la ecuación 3.

La ecuación 3 para la caída de presión, presenta dos términos en su lado derecho y cada uno de ellos representa un factor, la pérdida de energía relacionada con la viscosidad y la pérdida de energía cinética respectivamente. A números de Reynolds bajos, las pérdidas viscosas predominan y la ecuación se simplifica a :

$$\frac{\Delta p}{L} g_c = 150 \frac{1 - \epsilon_{mf}}{\epsilon_{mf}^3} \frac{\mu V_{mf}}{\sigma_s d_p^2} \quad \text{Re} = \frac{d_p \rho_g V_{mf}}{\mu} < 20$$

Ecuación 4.

Por el contrario a altos números de Reynolds, solamente deben considerarse las pérdidas por energía cinética:

$$\frac{\Delta p}{L} g_c = 1.75 \frac{1 - \epsilon_{mf}}{\epsilon_{mf}^3} \frac{\rho_g V_s^2}{\sigma_s d_p} \quad \text{N}_{\text{Re}} > 1000$$

Ecuación 5.

Cuando en el lecho hay una mezcla de partículas, d_p se reemplaza por \bar{d}_p .

La fluidización incipiente sucede cuando:

$$\left[\begin{array}{l} \text{fuerza de arrastre del gas} \\ \text{moviéndose hacia arriba.} \end{array} \right] = (\text{peso de las partículas})$$

Ecuación 6a.

o sea que :

$$\Delta p A_t = (A_t L_{mf}) (1 - \epsilon_{mf}) (\rho_s - \rho_g) \frac{g}{g_c}$$

Ecuación 7.

En un lecho en la condición mínima de fluidización, se tiene un espacio vacío ligeramente mayor que en un lecho empaçado, y corresponde a la pérdida del estado de lecho empaçado.

La velocidad incipiente de fluidización, se encuentra combinada en las ecuaciones 3 y 7, de donde resulta una ecuación cuadrática para la velocidad mínima de fluidización:

$$\frac{1.75}{\sigma_s \epsilon_{mf}^3} \left[\frac{d_p V_{mf} \rho_g}{\mu} \right]^2 + 150 \frac{(1 - \epsilon_{mf}) (d_p V_{mf} \rho_g)}{\sigma_s^2 \epsilon_{mf}^3 \mu} = \frac{d_p^3 \rho_g (\rho_s - \rho_g) g}{\mu^2}$$

Ecuación 8

CAPITULO 4.

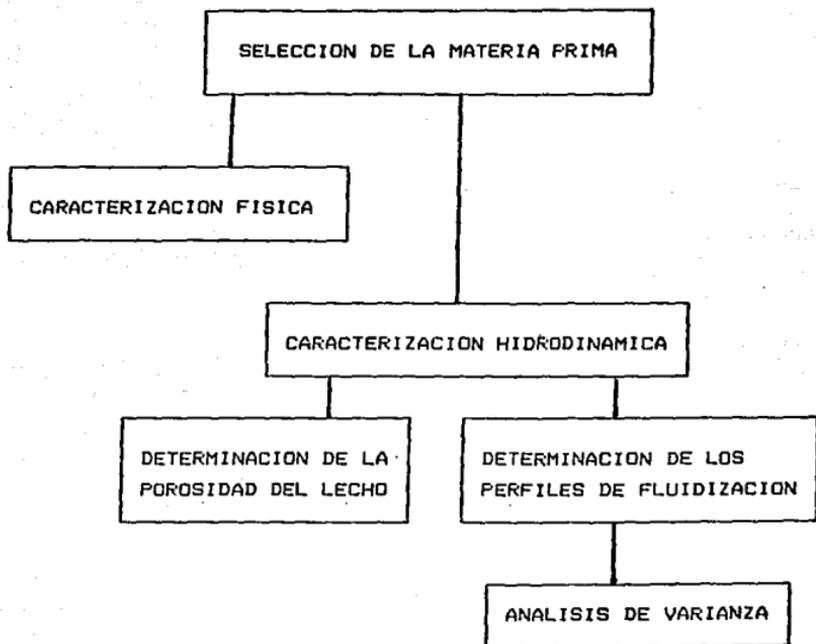
DESARROLLO EXPERIMENTAL.

En la figura 5. se anotan las etapas cubiertas por este estudio, que fueron:

- a) Selección de la Materia Prima. Las muestras fueron adquiridas en los principales beneficios de Atoyac, Gro., Huatusco, Ver., y Xicotepac, Pue., eligiéndose estas ciudades por su diferencia de altura. Se escogió la variedad *Coffea arábica* l. por ser la de mayor producción nacional, adquiriéndose muestras de café oreado para los fines de este estudio.
- b) Caracterización Física. Con 5 lotes de 20 granos de café de cada una de las regiones, se evaluaron las siguientes características: Volumen medio unitario, densidad aparente promedio, dimensiones del grano, diámetro medio unitario, esfericidad, humedad del producto fresco y humedad del producto seco (1,7,10).
- c) Caracterización Hidrodinámica. Se evaluó la porosidad del lecho empacado para cada una de las regiones, y se determinaron los perfiles de fluidización evaluándose primero la caída de presión debida al distribuidor de aire. Después con el equipo cargado a alturas de lecho empacado de 0.07, 0.10 y 0.13 m , se evaluaron las caídas de presión provocadas por la variación de la altura a diferentes velocidades superficiales de aire. Con estos datos se contruyeron las gráficas correspondientes con las que se evaluó el dato de velocidad mínima de fluidización correspondiente a cada altura de lecho empacado y al estado (humedo - seco) de la materia prima.

Para identificar cada una de las variables se utilizó una

Figura 5. DESARROLLO EXPERIMENTAL.



clave, la cual consta de 4 letras y un número, la primera de las letras identifica al material de prueba (café) empleándose una "C", la segunda habla de la región utilizándose la inicial del nombre de la región, la tercera se refiere al estado que presenta el material (humedo - seco) y la última indica el tipo de corrida (ida - regreso), para la corrida de ida, no se usó ninguna letra, mientras que la de regreso, se empleó la letra "r". El número nos indica la altura de lecho empacado.

Ejemplo:

CAS7 debe leerse: Café Atoyac Seco 0.07 m de Ida.

CAS7R debe leerse: Café Atoyac Seco 0.07 m de Regreso.

d) Análisis Estadístico. Con los datos obtenidos de la velocidad mínima de fluidización, se realizó un análisis de varianza multivariable con el fin de evaluar la significancia de los efectos (altura, estado y región) en esta determinación.

CAPITULO 5. MATERIALES Y METODOS.

5.1. MATERIALES.

5.1.1. MATERIA PRIMA.

Como material de prueba se empleo el café oreado *Coffea arábica* L., adquirido en los beneficios más importantes de Atoyac, Gro., Huatusco, Ver., y Xicotepec, Pue.

5.1.2. EQUIPO DE LABORATORIO.

- Secodor de lecho fluidizado. El diagrama del equipo se muestra en la figura 6. Este fue diseñado y construido con anterioridad para la realización de estudios cinéticos de deshidratación de hortalizas, y esta basado en un estudio hidrodinámico previo (15). Consiste principalmente de los siguientes elementos:

a) Sistema para mover el aire. Constituido por un turboventilador de diámetro de 38 cm (A), con un motor de 0.5 c.f., 2850 - 3450 rpm, 127 / 220 V.C.A. y 60 Hz. (B).

b) Sistema de conducción de aire. Constituido por dos ductos y un codo de 90 (F). El primero de 10 cm. de diametro nominal es de fierro, y cuenta con una compuerta (C) para regular el flujo del aire. El segundo es de material acrílico de 10 cm. de diámetro nominal, el codo de 90 es de PVC , así como la reducción tipo campana. Todo el sistema de conducción del aire va conectado desde la descarga del turboventilador hasta la entrada del recinto de secado y está forrado con una capa de lana de vidrio de 2 cm. de espesor para disminuir las pérdidas de calor.

c) Cuerpo del secador. El recinto de secado propiamente dicho, está constituido por un tramo de material acrílico de 2 mm. de espesor y 10 cm. de diámetro nominal sin costura (G), el cual esta constituido en tres tramos de la siguiente manera:

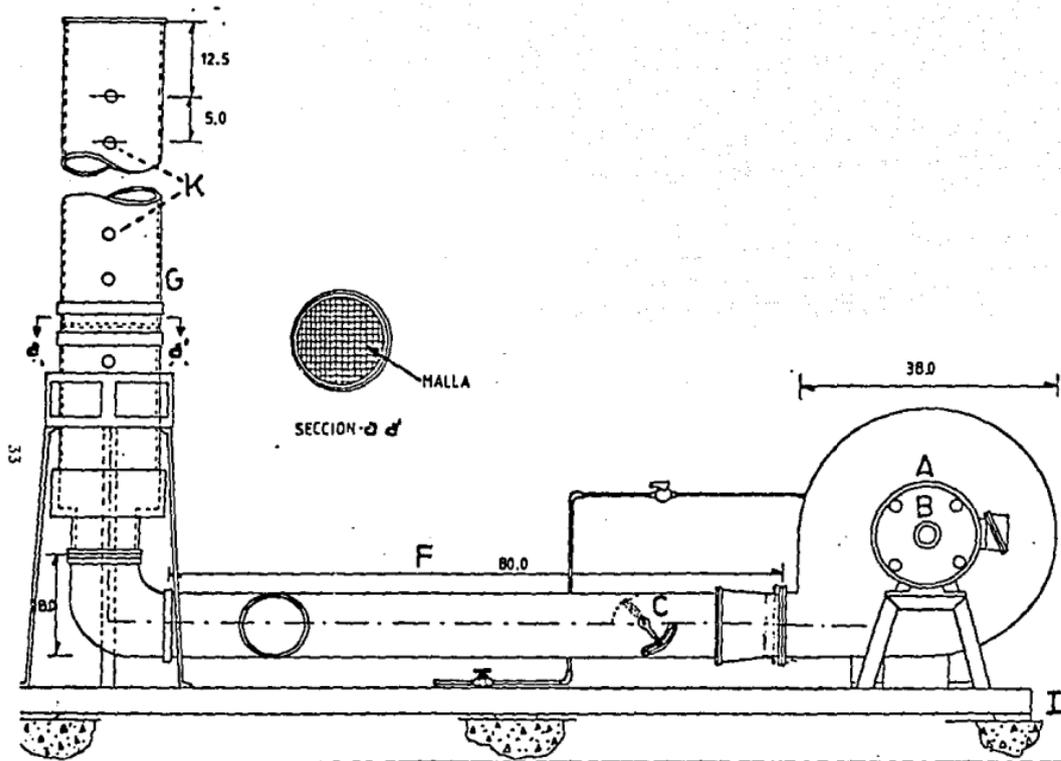


Figura 6 SECADOR POR LECHO FLUIDIZADO PARA VEGETALES

El primero está siempre sujeto al resto del equipo por medio de tornillos.

El segundo es en el que va contenida la muestra sobre el distribuidor de aire, esta segunda parte del recinto de secado va embonada a la primera, el registro de su peso es indicativo de la pérdida de humedad a través del tiempo, y el último tramo de tubería a su vez va empotrado en el segundo y su objetivo es dar una mayor altura para evitar que, a elevadas velocidades de aire y/o menor humedad de la muestra, ésta sea lavada por el mismo aire de secado.

El objetivo de emplear acrílico para la construcción de esta parte del equipo, es la de caracterizar cualitativamente el fenómeno de la fluidización.

d) Estructura para el armado del equipo. Consta de un carro plataforma fabricado en acero estructural (I). En donde se colocan el turboventilador, el sistema de conducción de aire los controles de temperatura y el cuerpo del secador.

e) Instrumentación. La instrumentación del equipo consiste básicamente en :

Un manómetro diferencial en forma de "U" con escala decimal.
Once válvulas de acuario para la toma de lectura de la caída de presión (K), una de las cuales se encuentra antes del distribuidor de aire y diez de ellas distribuidas a lo largo del recinto de secado .

- Balanza analítica, marca Mettler, modelo H - 10.
- Termoanemómetro digital.
- Calibrador Pie de Rey con Vernier.
- Balanza para la determinación de humedad en alimentos, marca

Ohaus, modelo MB 300.

- Microcomputadora marca IBM sistema personal 2, modelo 25.

- Material de vidrio común de laboratorio

5.2. METODOS.

5.2.1. CARACTERIZACION FISICA Y QUIMICA DEL MATERIAL DE PRUEBA.

5.2.1.1. VOLUMEN MEDIO UNITARIO DEL CAFE. V (15)

En una probeta graduada de 100 ml. que contenga 50 ml. de aceite vegetal comestible, se adiciona un número conocido de granos de café. Una vez que están todos sumergidos, se registra el volumen desplazado. Se repite esta determinación 20 veces. El volumen registrado de aceite desplazado se relaciona con el número de granos de café adicionados y se obtiene el volumen promedio unitario del café.

$$V = \frac{\text{Volumen desplazado}}{\text{Número de partículas}}$$

Ecuación 9.

5.2.1.2. DIMENSIONES DE LA PARTICULA, d_m (18)

De acuerdo con Moshenin (18) se llevaron a cabo las mediciones de las tres aristas de 20 granos de café para obtener un promedio. Para esta prueba se utilizó un calibrador pie de rey con Vernier.

4.2.1.3. DIAMETRO EQUIVALENTE, d_p (7)

Según algunos autores (7) el tamaño de las partículas no esféricas se especifica en la fórmula de un diámetro equivalente, que es el diámetro de una esfera perfecta con el mismo volumen de partícula; para obtener este diámetro, se partió de la fórmula del volumen de una esfera, se despejó el radio y se substituyó el valor

del volumen medio unitario :

$$V = 4/3 \pi r^3$$

Ecuación 11.

5.2.1.3. DENSIDAD APARENTE PROMEDIO, ρ (15)

Una vez conocido el volumen medio unitario del café, solo se requiere determinar su masa media y así calcular su densidad. Se pesan los granos de café individualmente en una balanza analítica, tomando una muestra de el mismo número de granos a los considerados en la determinación del volumen unitario.

$$\text{peso unitario} = \frac{\text{peso de la muestra}}{\text{número de partículas}}$$

Ecuación 12a.

$$\text{densidad aparente} = \frac{\text{peso unitario}}{\text{volumen unitario}}$$

Ecuación 12b.

5.2.1.4. CONTENIDO DE HUMEDAD, H (1)

Se llevó a cabo utilizando una termobalanza digital para la determinación de la humedad en alimentos. Esta determinación se realizó en granos de café húmedos y secos.

5.2.1.5 ESFERICIDAD MEDIA DEL CAFE. σ (18)

El concepto de esfericidad se fundamenta en las propiedades isoperimétricas de una esfera. Moshenin (18) considera que el volumen de un sólido con características isoperimétricas, es igual al volumen de un elipsoide triaxial con intercepciones a, b, c, y que el diámetro de la esfera circunscrita es la intercepción más larga del elipsoide. Así, el grado de esfericidad lo expresa de la

siguiente manera:

$$c = \frac{(abc)^{1/3}}{a}$$

Ecuación 13.

5.2.2. EVALUACIÓN DE LOS PARAMETROS DE FLUIDIZACIÓN.

5.2.2.1. DENSIDAD DEL AIRE. ρ_a (15)

Para la determinación de la densidad del aire se procede a tomar las lecturas correspondientes el día y hora programadas para el experimento, en el lugar en el que éste se lleve a cabo.

Con un psicrómetro se determinan las temperaturas de bulbo seco y bulbo húmedo. Se repiten las mediciones hasta obtener por triplicado las mismas temperaturas. A continuación, con las temperaturas obtenidas se interpola en la carta psicrométrica para obtener la humedad absoluta respectiva y se sustituye en la ecuación descrita por Treybal (26) :

$$V_m = 0.082 \frac{1}{M_B} + \frac{Y'}{M_A} \frac{T_{w_s} + 273}{P_{atm}}$$

Ecuación 14.

Obteniéndose el inverso del volumen específico húmedo del aire se conoce la densidad.

5.2.2.2. POROSIDAD DEL LECHO, ϵ (8,18).

Se llena un vaso de precipitados de 500 ml. con una cantidad de granos de café tal, que sea necesaria para alcanzar tal aforo. Es importante que al colocar los granos en el vaso, se efectue la operación en forma continua y lenta para obtener un empaque en

condiciones normales. Puesto que si se golpea el vaso para obtener un mejor reacomodo, el volumen total se verá disminuido. La porosidad se calcula de la siguiente manera:

$$(\text{Numero de Particulas}) (\text{Volumen Medio Unitario}) = \text{Volumen ocupado}$$

Ecuación 15a.

$$500 \text{ ml} - \text{Volumen Ocupado} = \text{Volumen Vacío}$$

Ecuación 15b.

$$\frac{\text{Volumen Vacío}}{\text{Volumen Total}} = \text{Porosidad}$$

Ecuación 15c.

5.2.3. DETERMINACION DE LA CAIDA DE PRESION CON RESPECTO A LA VELOCIDAD SUPERFICIAL DEL AIRE.

5.2.3.1 DETERMINACION DE LA CAIDA DE PRESION PROVOCADA POR EL DISTRIBUIDOR DE AIRE.

Con el equipo vacío, se conecta el manómetro a las válvulas que están justamente arriba y abajo del distribuidor de aire. Se determina la caída de presión provocada por la presencia del distribuidor a diferentes velocidades de aire. (15)

5.2.3.2. DETERMINACION DE LA CAIDA DE PRESION PROVOCADA POR EL LECHO EMPACADO Y FLUIDIZADO.

Una vez cargado el equipo con una altura de lecho de 0.07, 0.1, y 0.13 m. y conectado al manómetro por abajo del distribuidor de aire y por arriba del lecho, se evalúa la caída de presión que experimenta el lecho al hacerle pasar aire a diferentes

velocidades. Para encontrar el valor de caída de presión provocada exclusivamente por el lecho a una velocidad dada, el valor experimental encontrado se le resta el de la caída de presión provocado por el distribuidor. De esta técnica resulta, por lo tanto, que para cada valor de velocidad superficial de aire se tiene una diferencia manométrica (caída de presión), y tales valores se dibujan en una figura a escala logarítmica. Esta metodología se repite a cada altura de lecho propuesta.

5.2.3.3. CALCULO DE LA VELOCIDAD MINIMA DE FLUIDIZACION.

Con el fin de comparar el valor de la velocidad mínima de fluidización, se comparó este parámetro a partir de la ecuación propuesta por Kunii (11), evaluando el valor de la velocidad mínima de fluidización (ecuación 8).

CAPÍTULO V RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1. PROPIEDADES FÍSICAS DEL MATERIAL.

6.1.1. VOLUMEN MEDIO UNITARIO (V)

De acuerdo con lo expuesto en la sección 5.2.1.1., se efectuó la determinación para 20 lotes de 20 unidades cada uno, para cada una de las regiones estudiadas, obteniéndose los siguientes resultados:

Atoyac $V = 0.31660$ m.

Huatusco $V = 0.03500$ m.

Xicotepec $V = 0.03150$ m.

6.1.2. DIMENSIONES DE LA PARTICULA. (dm)

Los resultados obtenidos de acuerdo al procedimiento descrito anteriormente dan como resultado lo siguiente.

Atoyac $dm = 0.008876$ m.

Huatusco $dm = 0.009068$ m.

Xicotepec $dm = 0.008418$ m.

6.1.3. DIAMETRO EQUIVALENTE DE PARTICULA. (dp)

Para las dimensiones de partícula se encontraron los siguientes resultados :

Atoyac $dp = 0.008456$ m.

Huatusco $dp = 0.009580$ m.

Xicotepec $dp = 0.008442$ m.

6.1.4. DENSIDAD APARENTE PROMEDIO, (ρ)

Primeramente se determinó la masa media del café en un análisis de 20 unidades:

Atoyac $m = 3.126 \times 10^{-4}$ m.

Huatusco $m = 3.620 \times 10^{-4}$ m.

Xicotepec $m = 3.593 \times 10^{-4}$ m.

Después con la masa y volumen medios se obtuvo la densidad unitaria promedio:

Atoyac $\rho = 0.09875 \text{ Kg/m}^3$.

Huatusco $\rho = 0.10342 \text{ Kg/m}^3$.

Xicotepec $\rho = 0.11408 \text{ Kg/m}^3$.

6.1.5. CONTENIDO DE HUMEDAD.

El porcentaje de humedad encontrado en la materia prima fue el siguiente:

Atoyac 58.9 %

Huatusco 57.5 %

Xicotepec 56.8 %

Una vez que los granos de café fueron corridos en el lecho fluidizado los resultados encontrados fueron los siguientes:

Atoyac $h = 11 \%$

Huatusco $h = 12 \%$

Xicotepec $h = 11 \%$

6.1.6. ESFERICIDAD MEDIA DEL CAFÉ. (σ)

De acuerdo con la teoría de Moshenin (18), se efectuó la determinación de las intercepciones a, b, y c para 20 muestras encontrándose los siguientes resultados :

Atoyac $\sigma = 0.3825$

Huatusco $\sigma = 0.2869$

Xicotepec $\sigma = 0.3876$

Las características más significativas para el presente estudio, fueron la densidad aparente y el diámetro equivalente de la partícula por ser las características cuyo valor es dependiente de las demás propiedades analizadas, pero que no muestran entre sí una dependencia.

6.2. CARACTERISTICAS HIDRODINAMICAS.

6.2.1. DENSIDAD DEL AIRE. (ρ_a)

Las temperaturas promedio de bulbo seco y de bulbo humedo obtenidas se dan a continuación :

$$T_{bs} = 20.6 \text{ C}$$

$$T_{bh} = 13.2 \text{ C}$$

Com ambas temperaturas se interceptó la carta psicométrica a la presión atmosférica de la Ciudad de México encontrándose la humedad absoluta (Y') que fué:

$$Y' = 0.0866 \text{ Kg agua / kg aire seco.}$$

Si la presión atmosférica en la Ciudad de Mexico es 0.771 atm y el peso molecular del aire (M_b) y del agua (M_a) son 28.97 Kg/Kg mol y 18.02 Kg/Kg mol respectivamente, entonces el volumen especifico humedo del aire (V_m) por la ecuación 14 será :

$$V_m = 1.093 \text{ m}^3/\text{kg, siendo la densidad del aire :}$$

$$\rho_a = 0.9150 \text{ Kg}$$

6.2.2. VELOCIDAD MINIMA DE FLUIDIZACION (V_{mf}) Y CAIDA DE PRESION (Δp).

En el cuadro 3 se muestran las diferentes velocidades y las caídas de presión evaluadas de forma experimental. La V_{mf} no muestra diferencias significativas en cuanto a la corrida de ida y la de regreso, por lo tanto, se puede registrar de igual manera dependiendo su elección de la facilidad y comodidad para operar el equipo. La caída de presión muestra un aumento conforme se aumenta la altura de empacamiento del lecho. En el caso de la velocidad, ésta no se ve afectada por la altura de empacamiento. Así mismo las gráficas 1 a 36 muestran las figuras obtenidas al correr cada

uno de los experimentos, notándose en todas ellas el cambio de pendiente de una manera bien definida, lo cual es muy importante para la evaluación correcta de la velocidad mínima de fluidización.

El cuadro 6 ilustra los resultados del análisis de varianza multivariado para la probabilidad de que la hipótesis nula (H_0) sea verdadera, para cada uno de los factores bajo estudio, encontrándose que no existe diferencia significativa entre los niveles de estado y altura de lecho empacado, mientras que para el factor región productora del café sí existe diferencia, esto se puede atribuir a las características físicas como son el diámetro equivalente y la densidad, en las cuales se encuentra diferencia entre regiones.

6.2.3. ECUACION DE ERGUN Y POROSIDAD.

En el cuadro 4. se muestran los resultados de la velocidad mínima de fluidización predichas por la ecuación de Ergun, los cuales no se ajustan a los evaluados experimentalmente, esto puede deberse a la forma y tamaño de la partícula en estudio, así como los datos obtenidos para la porosidad del lecho encontrándose diferencias entre regiones en el tipo de empaque y ordenamiento de los granos, lo cual es debido a las diferencias de tamaño y diámetro de las distintas regiones.

6.2.4. NUMERO DE REYNOLDS Y NUMERO DE FROUDE.

En general la fluidización presentada para el café, fue de tipo agregativo, ya que se obtuvieron valores de número de Froude superiores a uno.

El tipo de flujo que se obtuvo fue turbulento, los valores de número de Reynolds que se obtuvieron fueron superiores a 100.

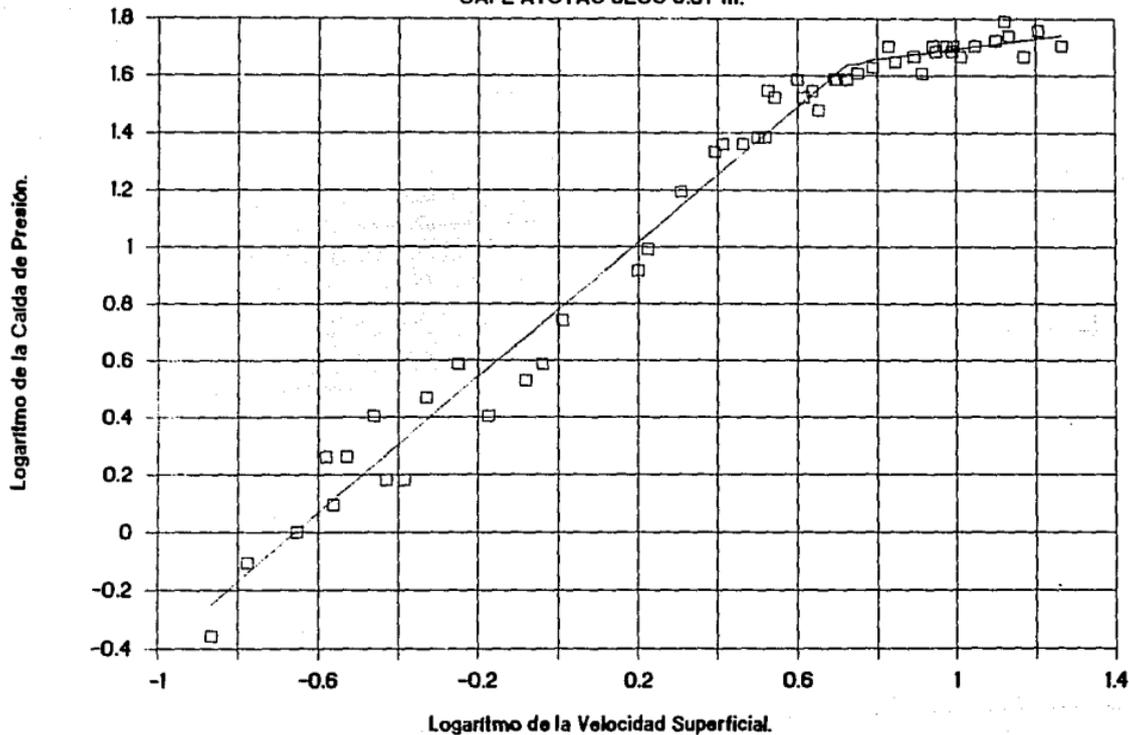
Los datos anteriores son esperados para un lecho empacado y

fluidizado en alimentos, por las diferentes características que presenta este tipo de partícula.

En el cuadro 5, se representan los valores obtenidos para cada una de las corridas.

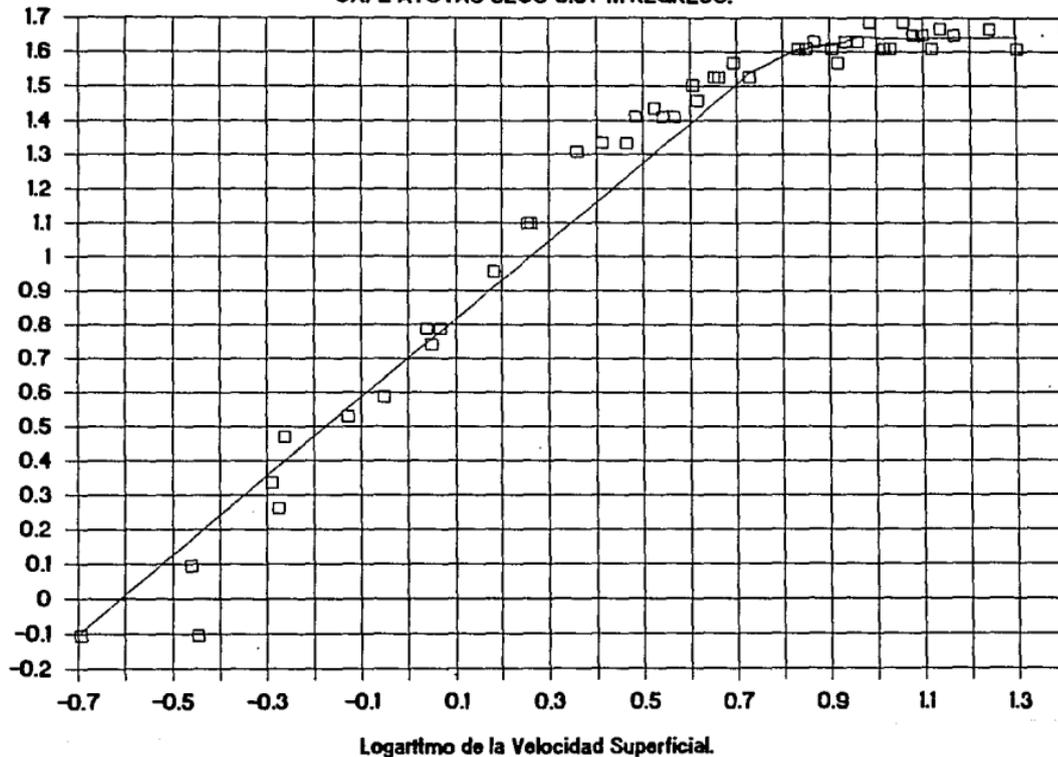
Gráfica 1. PERFIL HIDRODINAMICO.

CAFE ATOYAC SECO 0.07 m.



Gráfica 2. PERFIL HIDRODINAMICO.

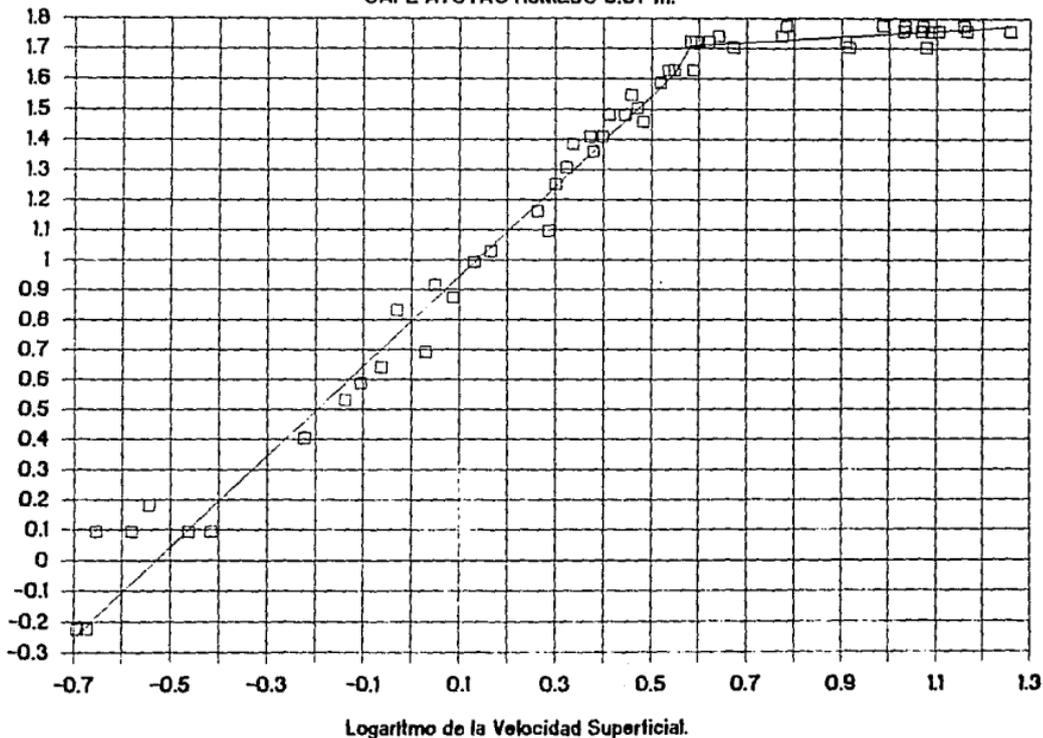
CAFE ATOYAC SECO 0.07 m REGRESO.



Gráfica 3. PERFIL HIDRODINAMICO.

CAFE ATOYAC HUMEDO 0.07 m.

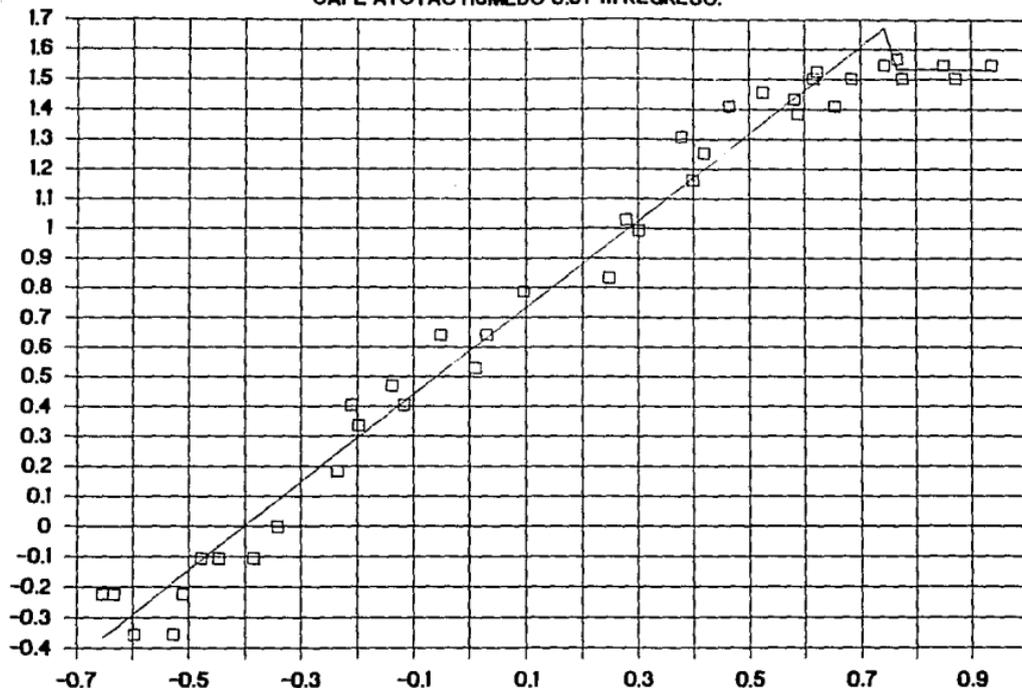
Logaritmo de la Caída de Presión.



Gráfica 4. PERFIL HIDRODINAMICO.

CAFE ATOYAC HUMEDO 0.07 m REGRESO.

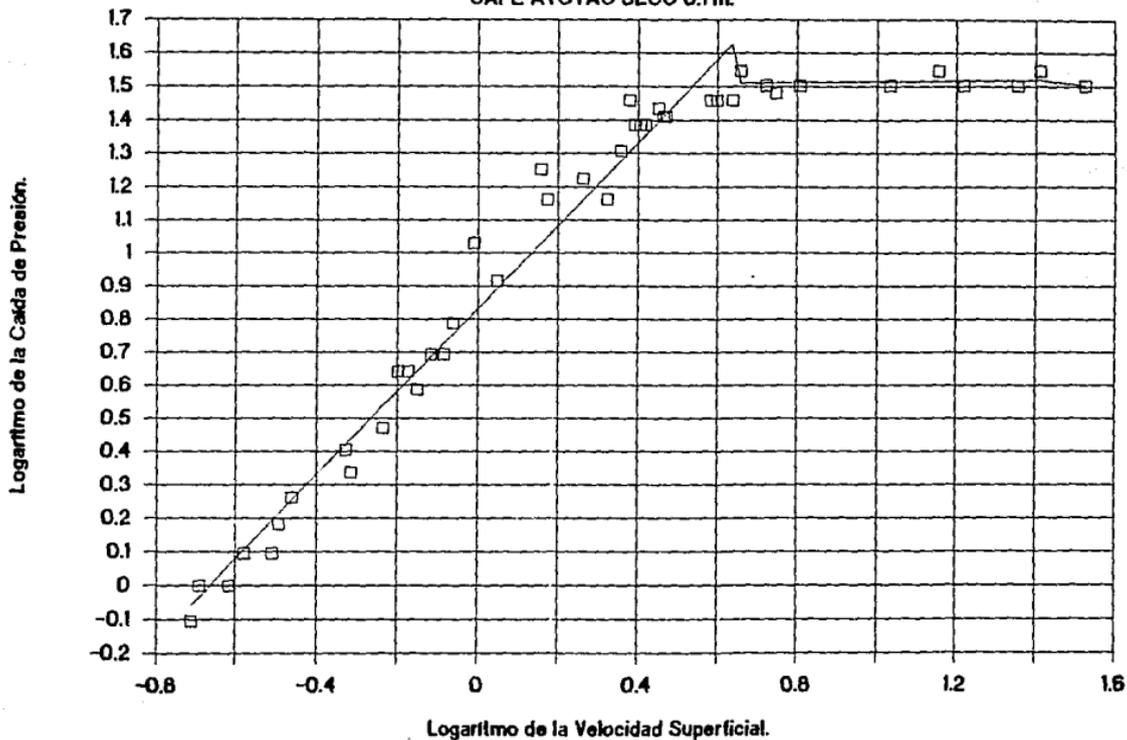
Logaritmo de la Caída de Presión.



Logaritmo de la Velocidad Superficial.

Gráfica 5. PERFIL HIDRODINAMICO.

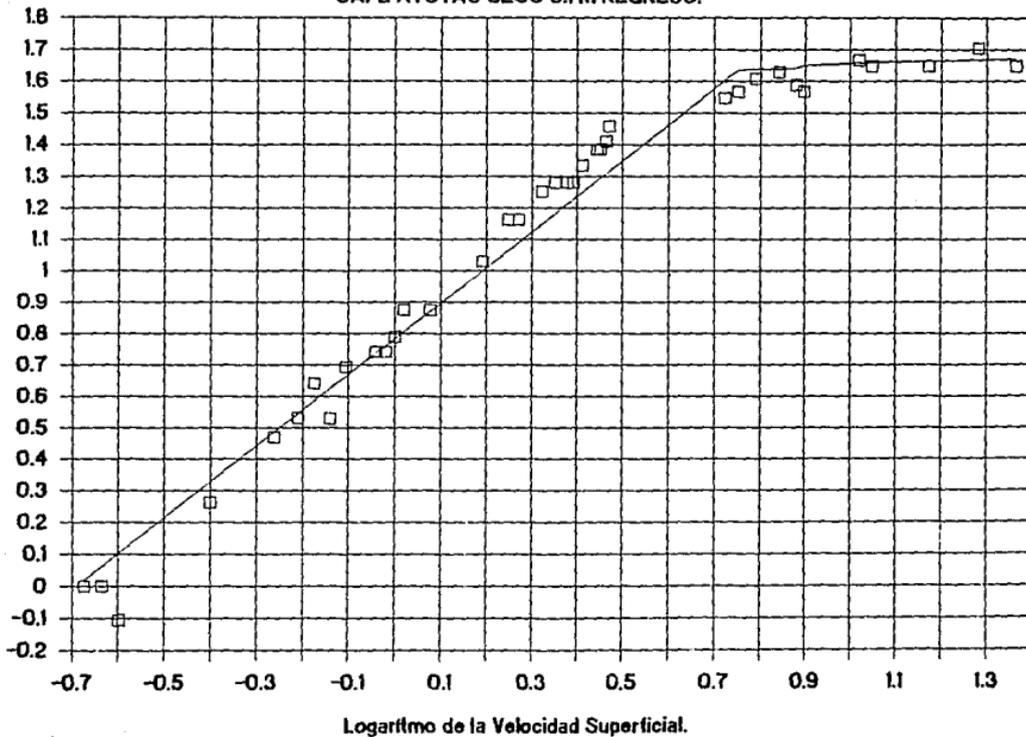
CAFE ATOYAC SECO 0.1m.



Gráfica 6. PERFIL HIDRODINAMICO.

CAFE ATOYAC SECO 0.1 m REGRESO.

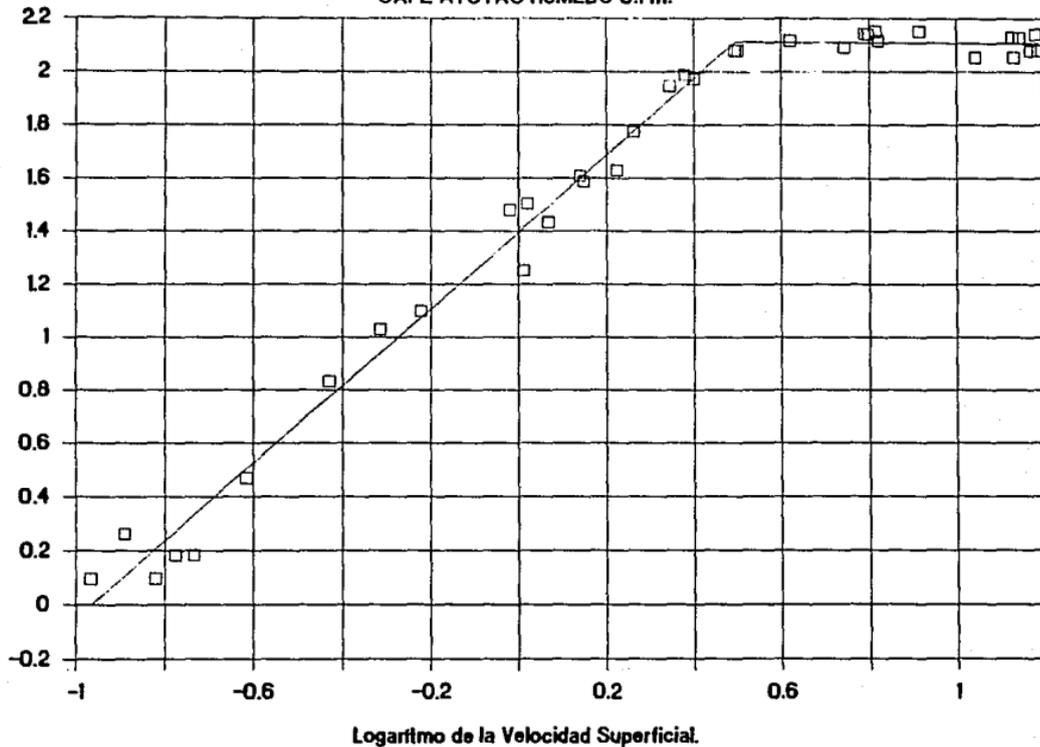
05
Logaritmo de la Caída de Presión.



Gráfica 7. PERFIL HIDRODINAMICO.

CAFE ATOYAC HUMEDO 0.1 m.

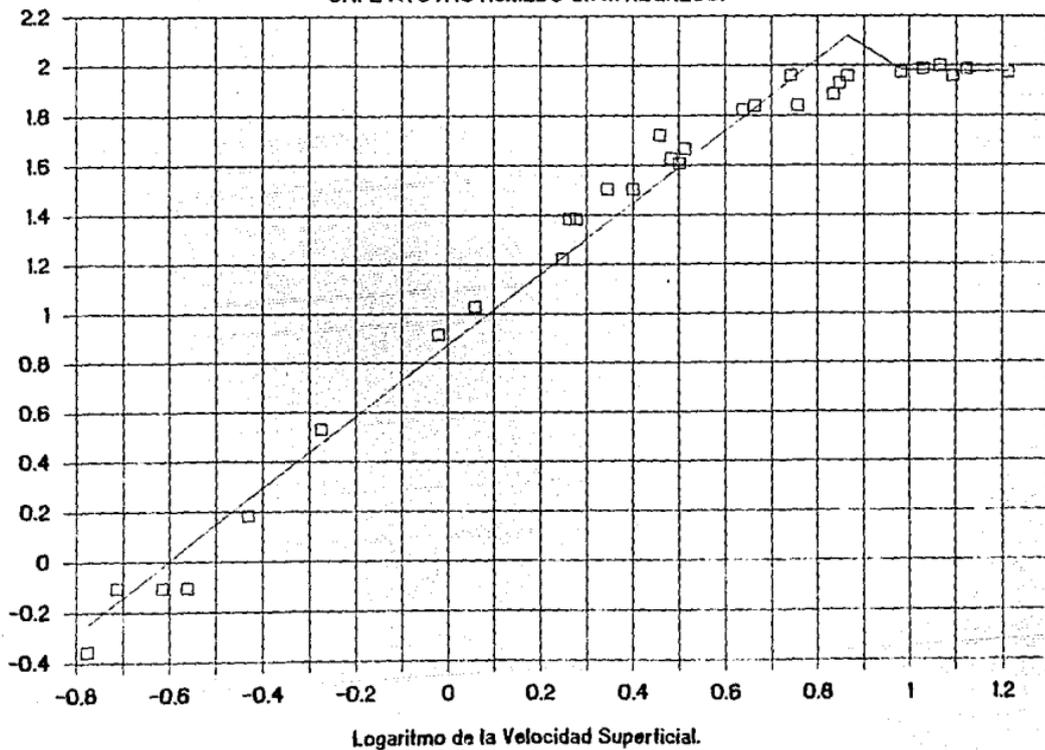
IS
Logaritmo de la Caída de Presión.



Grafica 8.PERFIL HIDRODINAMICO.

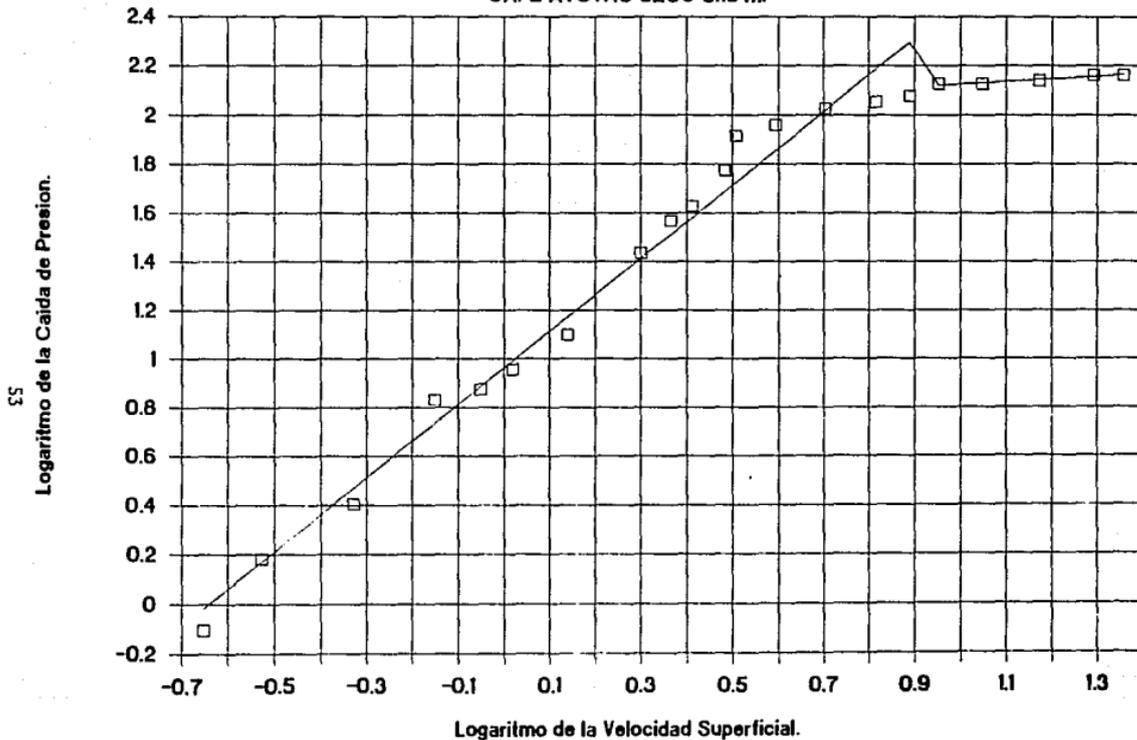
CAFE ATOYAC HUMEDO 0.1 m REGRESO.

25
Logaritmo de la Caída de Presión.



Grafica 9. PERFIL HIDRODINAMICO.

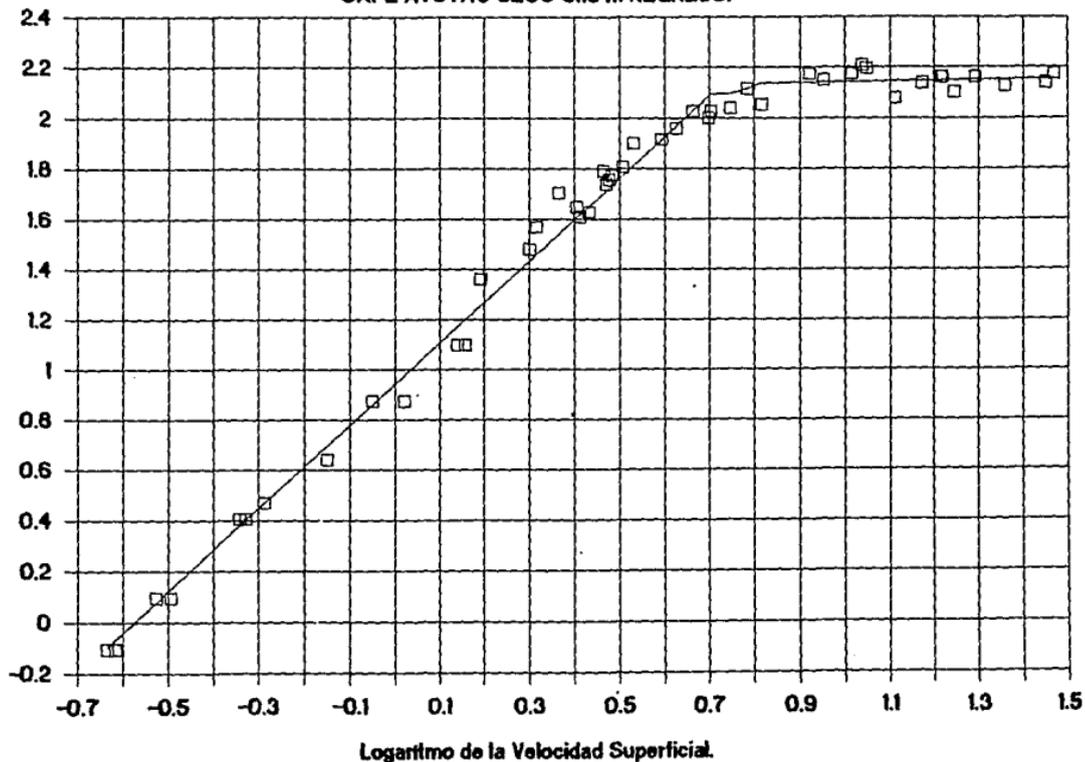
CAFE ATOYAC SECO 0.13 m.



Gráfica 10. PERFIL HIDRODINAMICO.

CAFE ATOYAC SECO 0.13 m REGRESO.

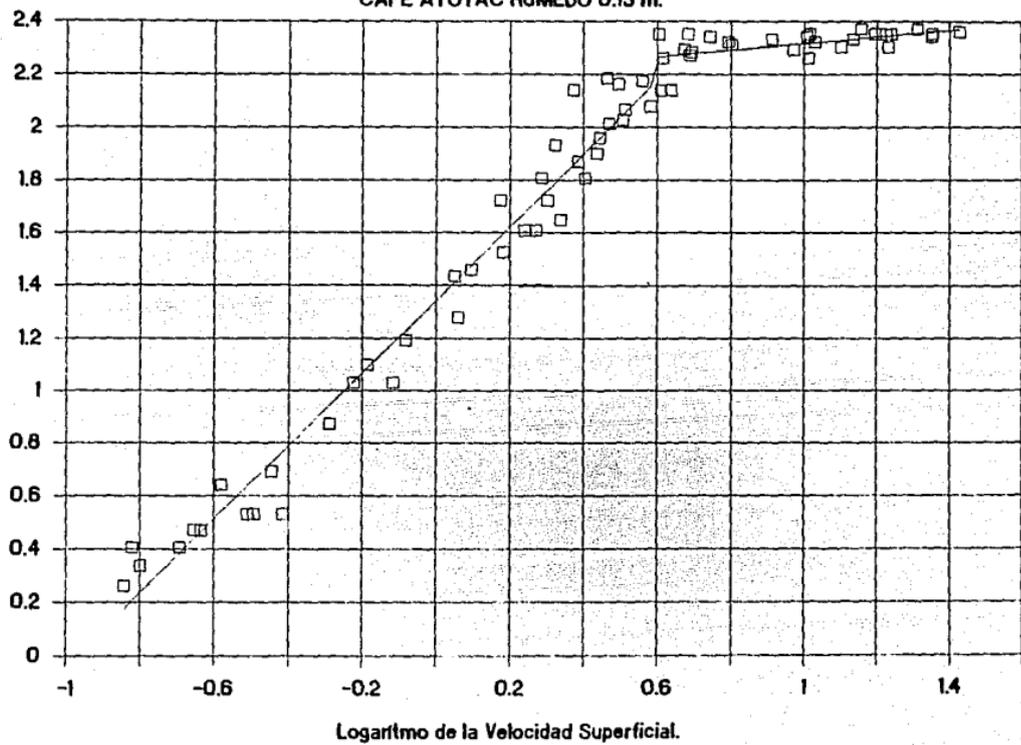
45
Logaritmo de la Caída de Presión.



Gráfica 11. PERFIL HIDRODINAMICO.

CAFE ATOYAC HUMEDO 0.13 m.

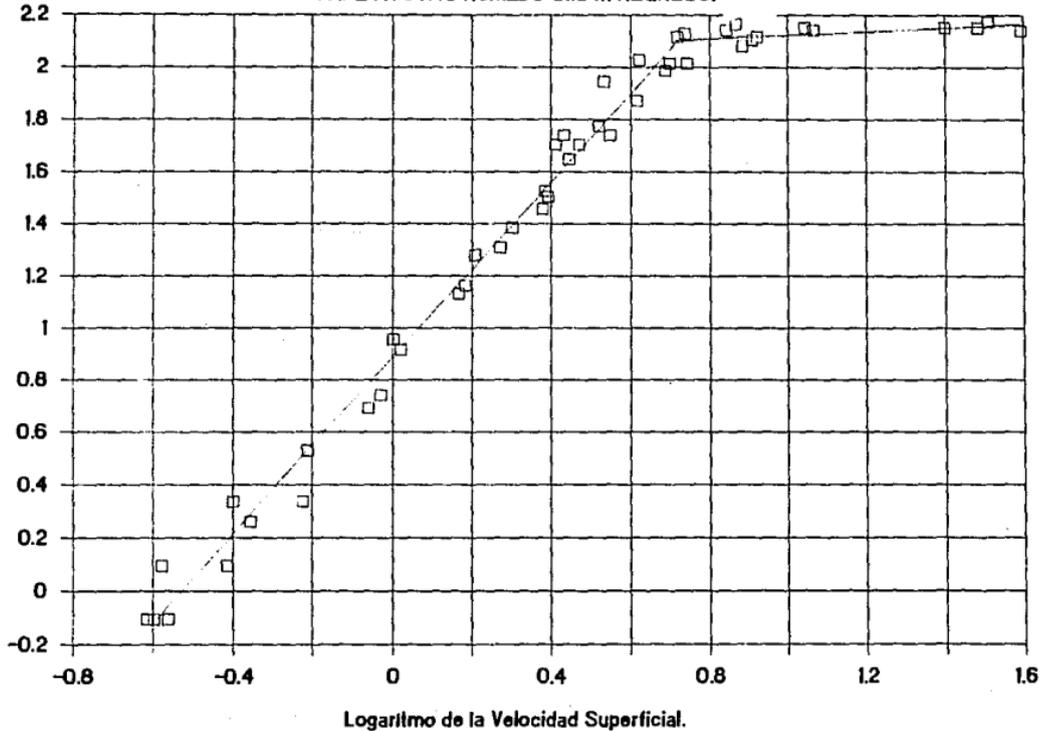
SS
Logaritmo de la Caída de Presión.



Gráfica 12. PERFIL HIDRODINAMICO.

CAFE ATOYAC HUMEDO 0.13 m REGRESO.

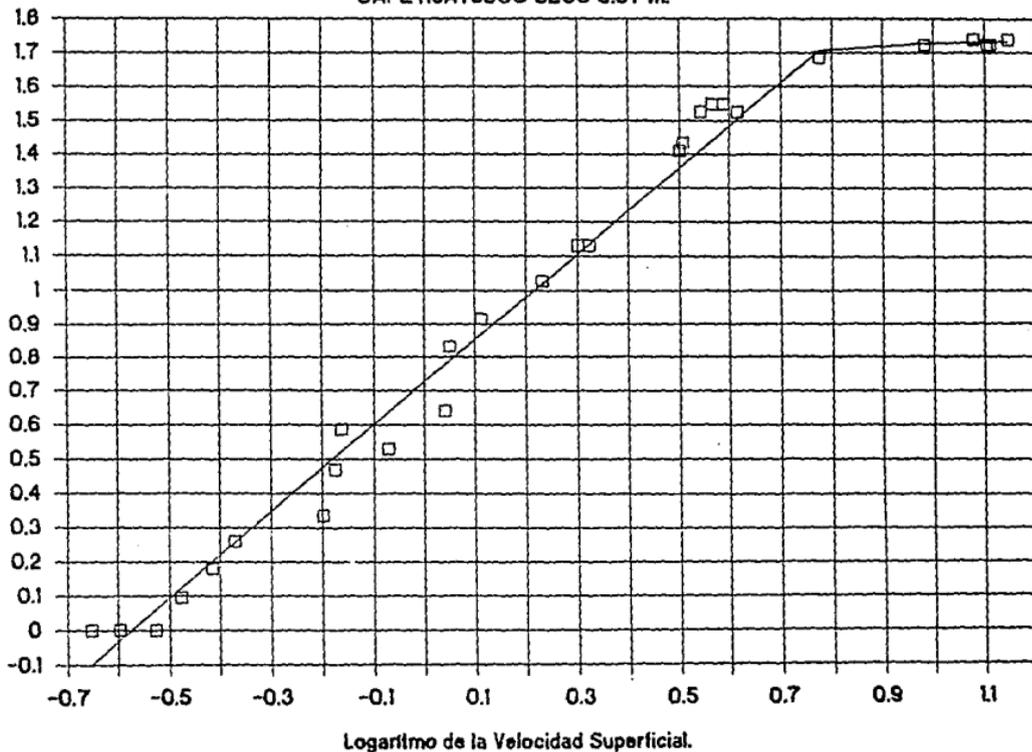
95
Logaritmo de la Caída de Presión.



Gráfica 13. PERFIL HIDRODINAMICO.

CAFE HUATUSCO SECO 0.07 m.

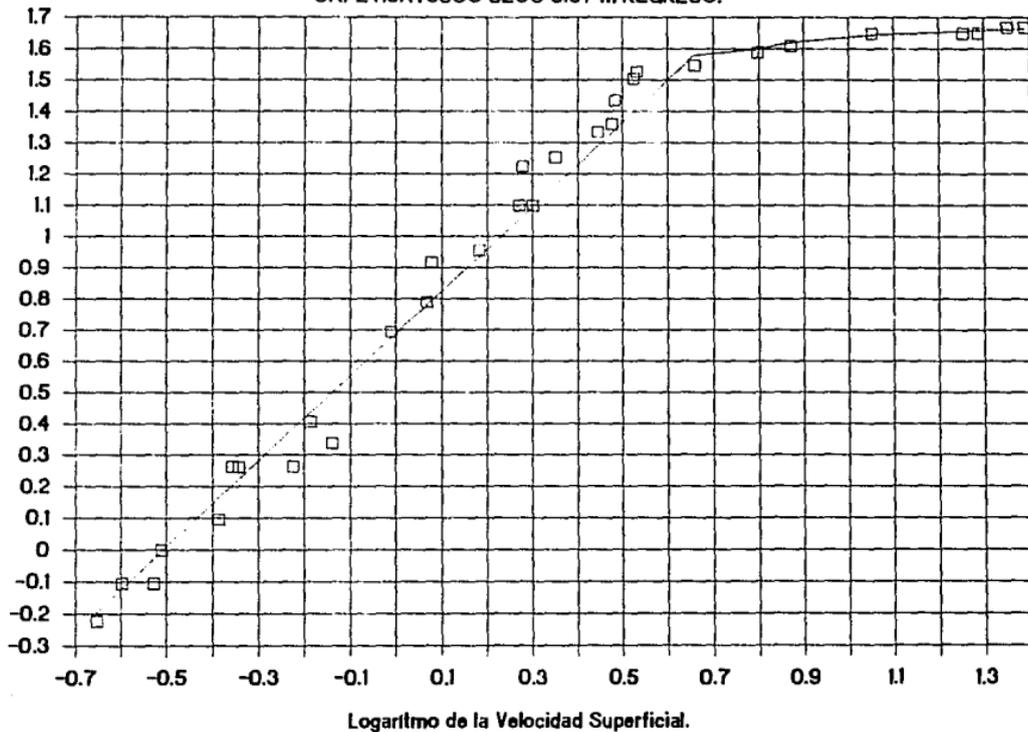
Logaritmo de la Caída de Presión.



Gráfica 14. PERFIL HIDRODINAMICO.

CAFE HUATUSCO SECO 0.07 m REGRESO.

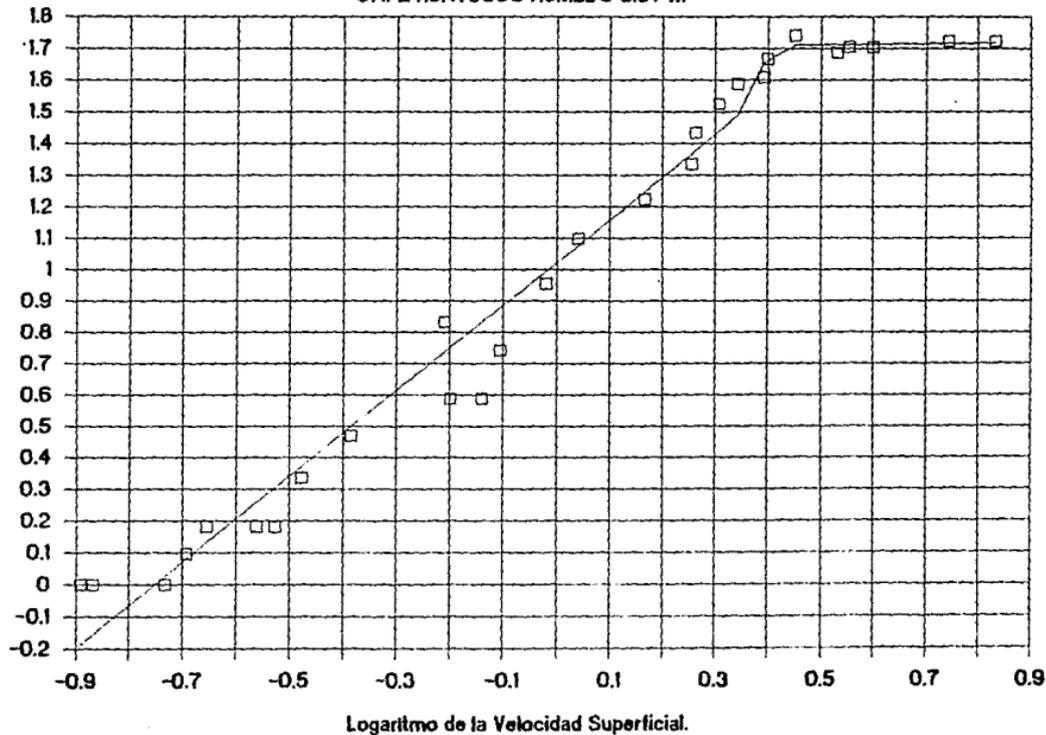
85
Logaritmo de la Caída de Presión.



Gráfica 15. PERFIL HIDRODINAMICO.

CAFE HUATUSCO HUMEDO 0.07 m

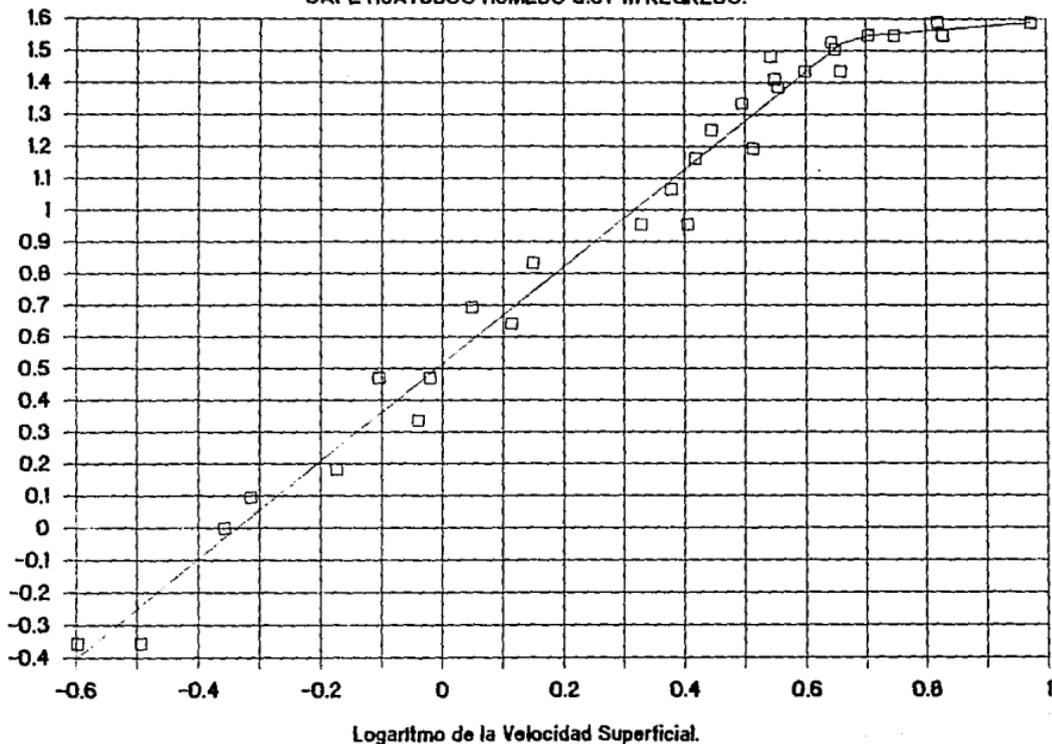
65
Logaritmo de la Caída de Presión.



Gráfica 16. PERFIL HIDRODINAMICO.

CAFE HUATUSCO HUMEDO 0.07 m REGRESO.

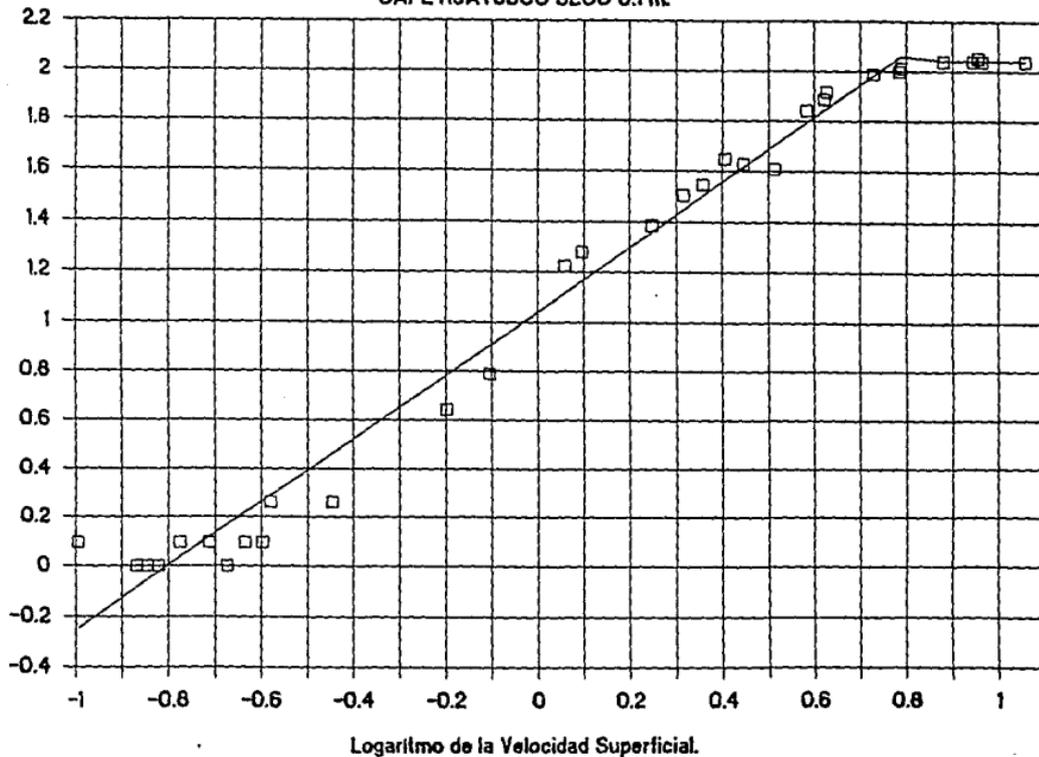
09
Logaritmo de la Caída de Presión.



Gráfica 17. PERFIL HIDRODINAMICO.

CAFE HUATUSCO SECO 0.1 m.

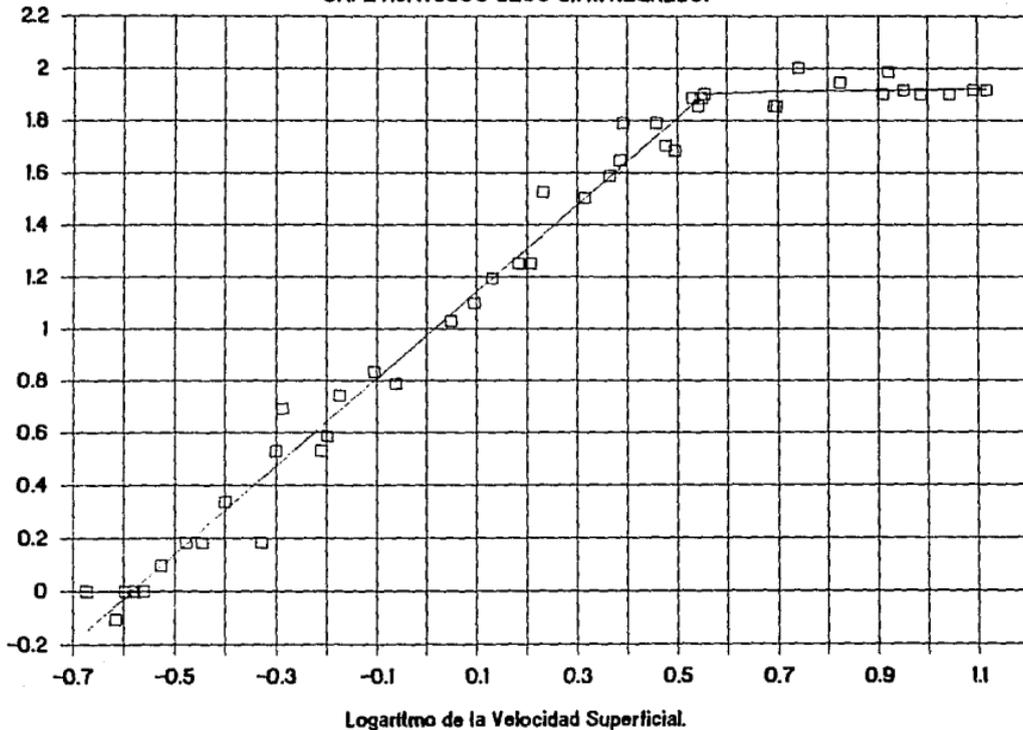
Logaritmo de la Caída de Presión.



Gráfica 18. PERFIL HIDRODINAMICO.

CAFE HUATUSCO SECO 0.1m REGRESO.

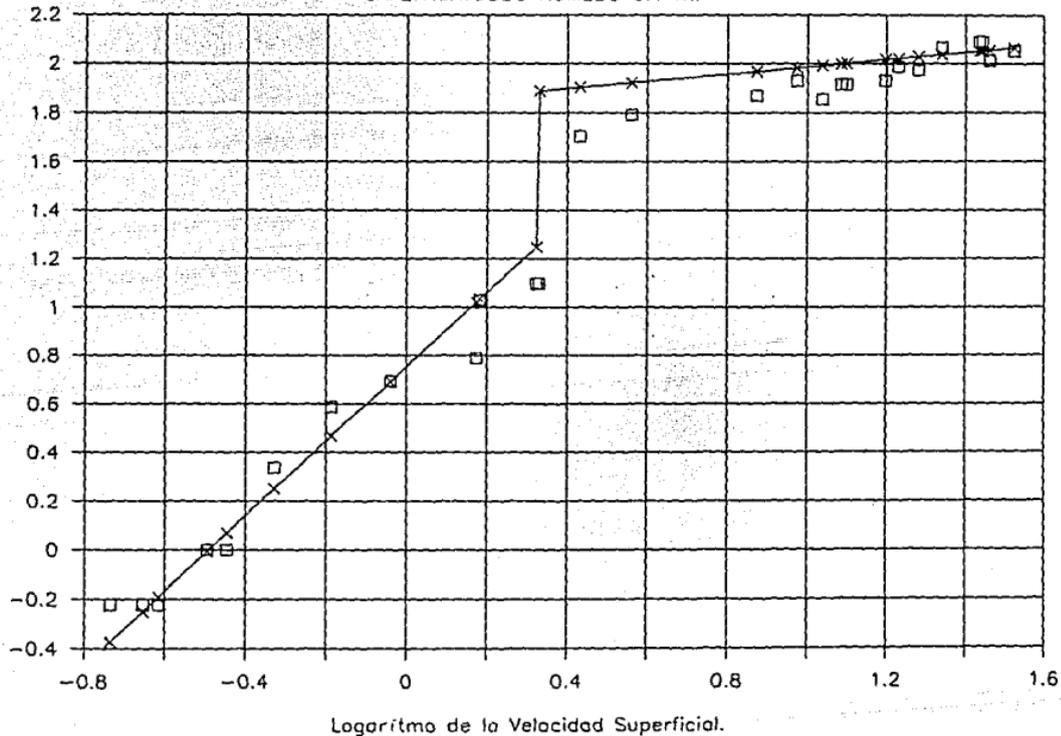
Logaritmo de la Caída de Presión.
62



Gráfica 19. PERFIL HIDRODINAMICO.

CAFE HUATUSCO HUMEDO 0.1 m.

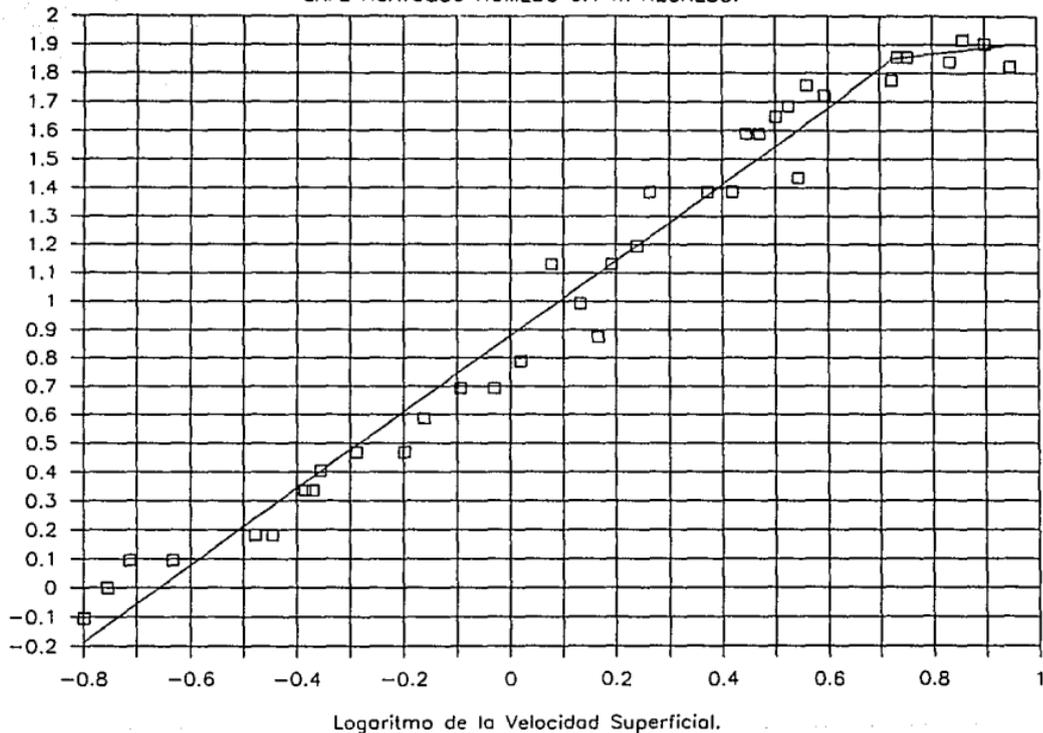
59
Logaritmo de la Caída de Presión.



Grafica 20. PERFIL HIDRODINAMICO.

CAFE HUATUSCO HUMEDO 0.1 m REGRESO.

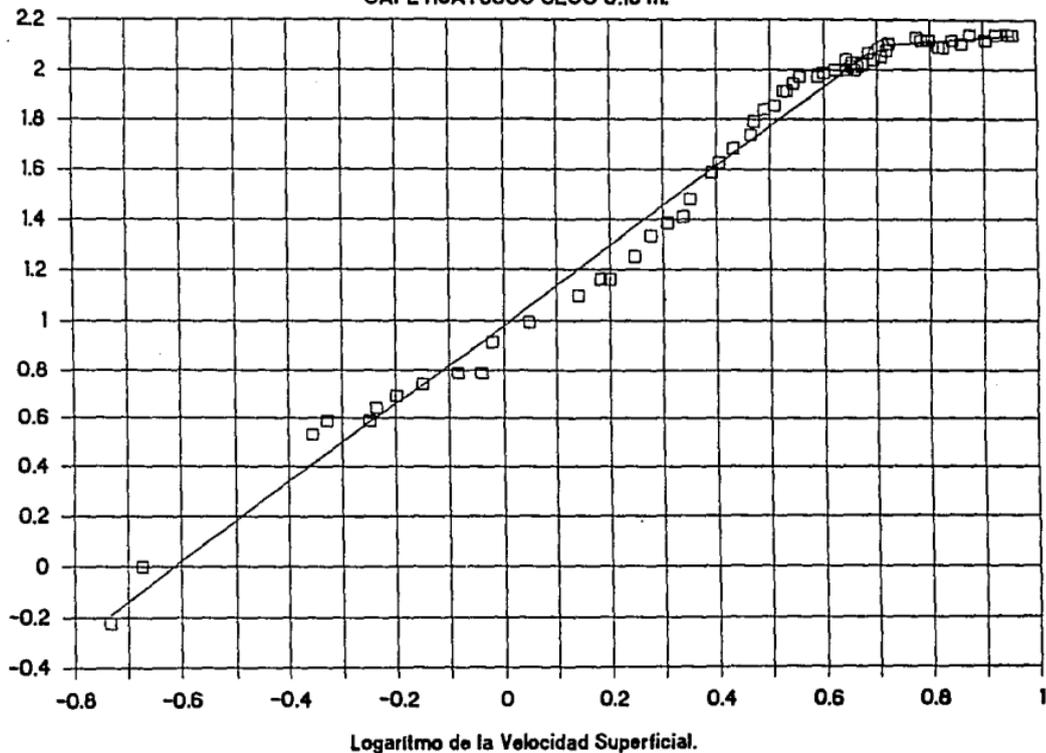
Logaritmo de la Caída de Presión.



Gráfica 21. PERFIL HIDRODINAMICO.

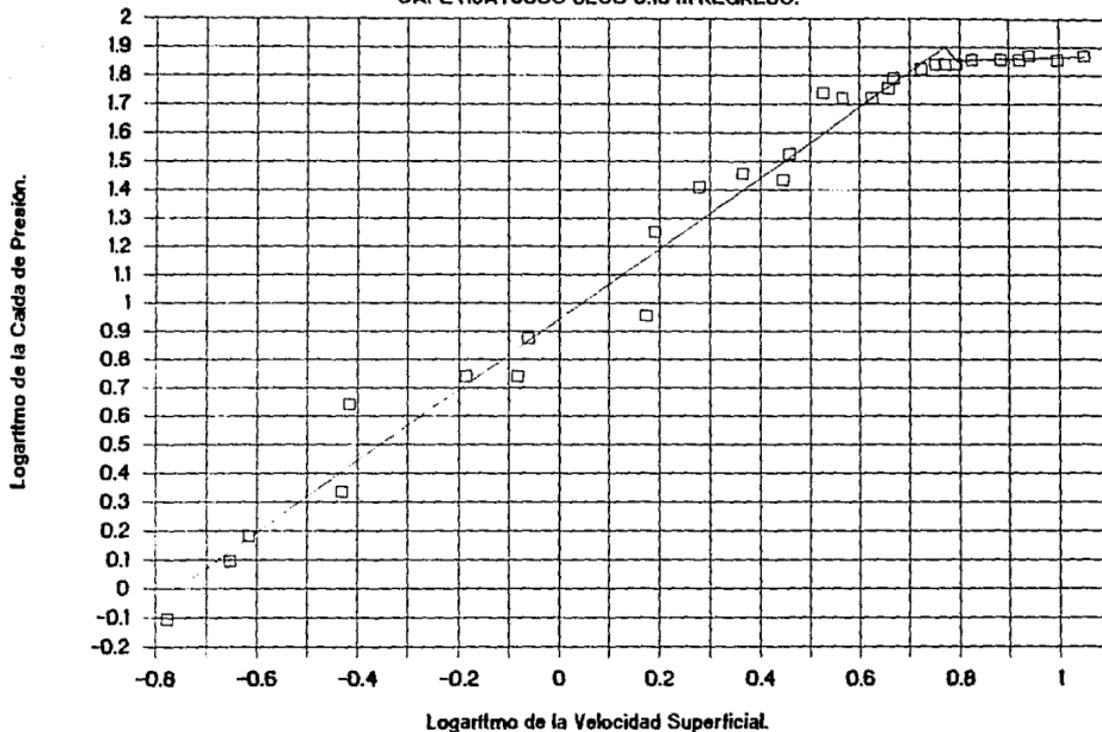
CAFE HUATUSCO SECO 0.13 m.

Logaritmo de la Caída de Presión.



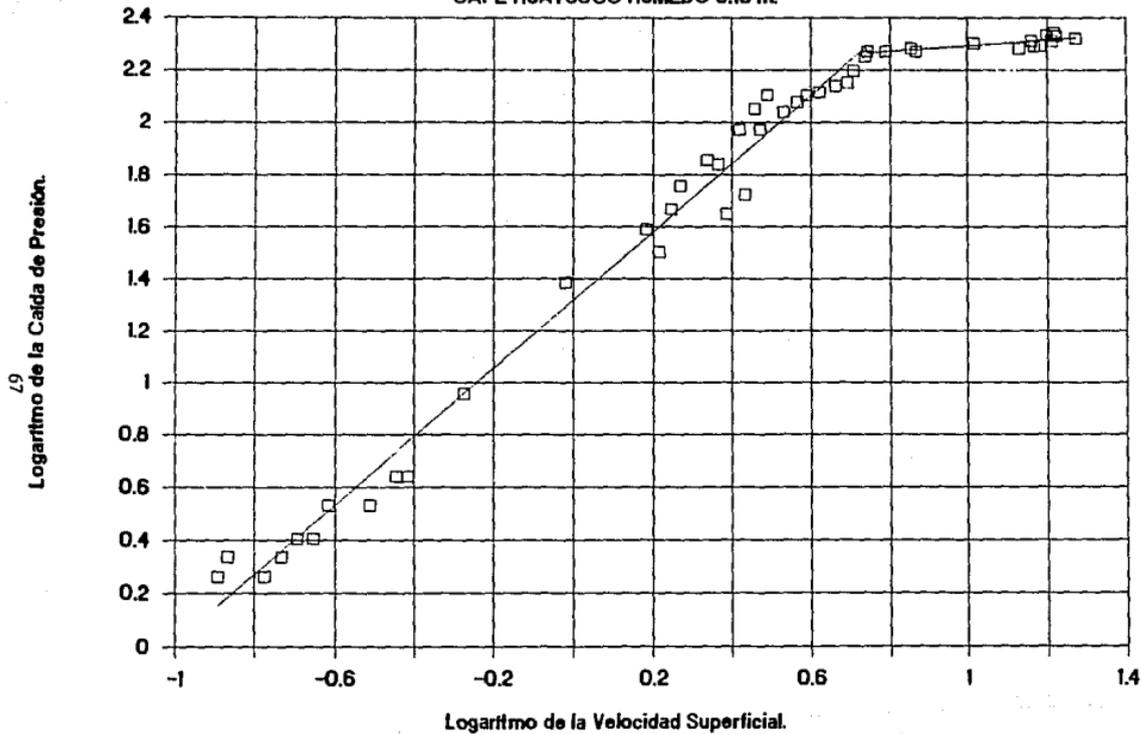
Gráfica 22. PERFIL HIDRODINAMICO.

CAFE HUATUSCO SECO 0.13 m REGRESO.



Gráfica 23. PERFIL HIDRODINAMICO.

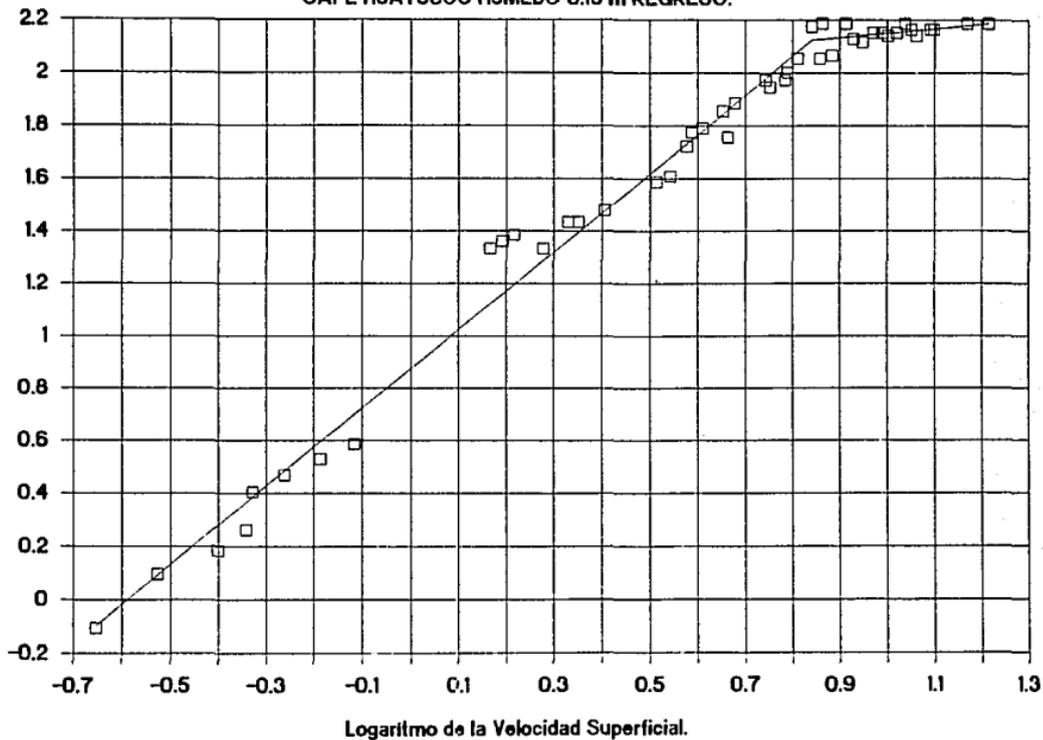
CAFE HUATUSCO HUMEDO 0.13 m.



Gráfica 24. PERFIL HIDRODINAMICO.

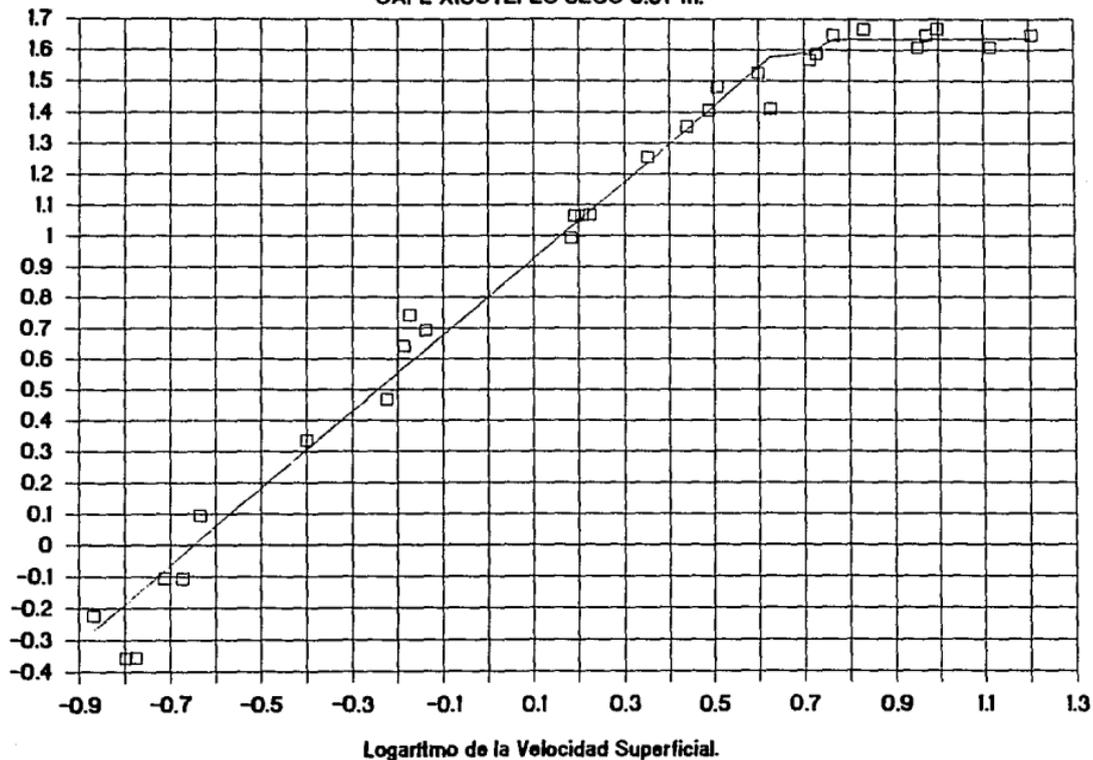
CAFE HUATUSCO HUMEDO 0.13 m REGRESO.

89
Logaritmo de la Caída de Presión.



Gráfica 25. PERFIL HIDRODINAMICO.

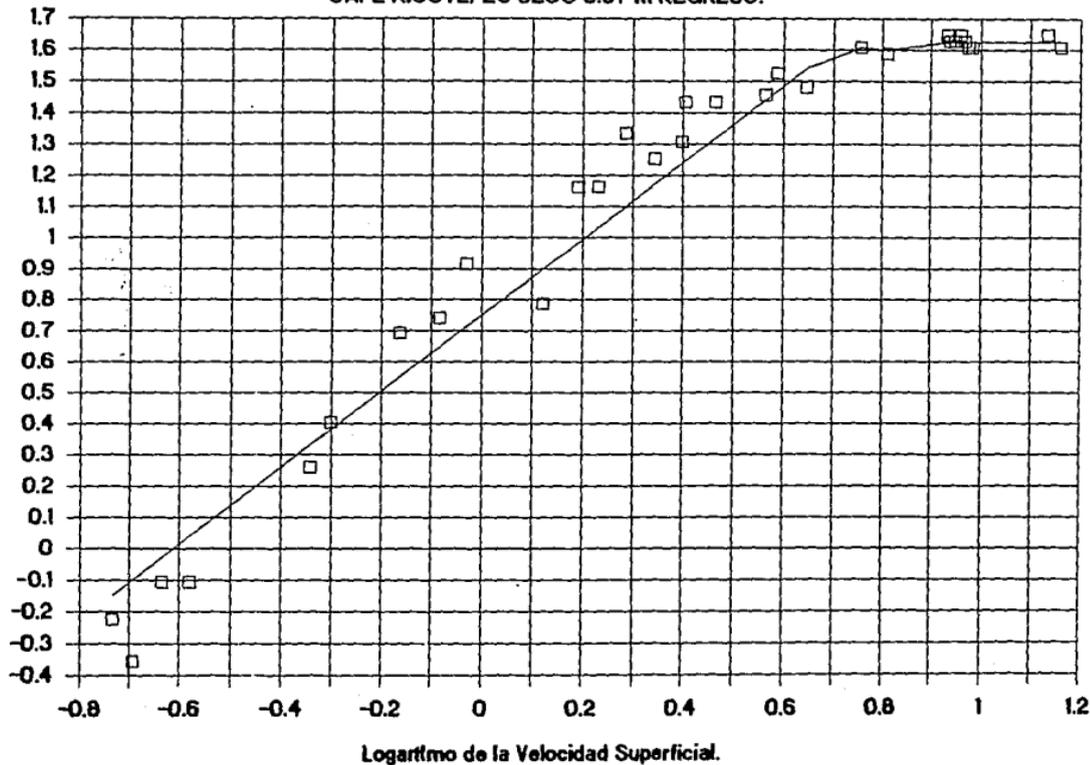
CAFE XICOTEPEC SECO 0.07 m.



Gráfica 26. PERFIL HIDRODINAMICO.

CAFE XICOTEPEC SECO 0.07 m REGRESO.

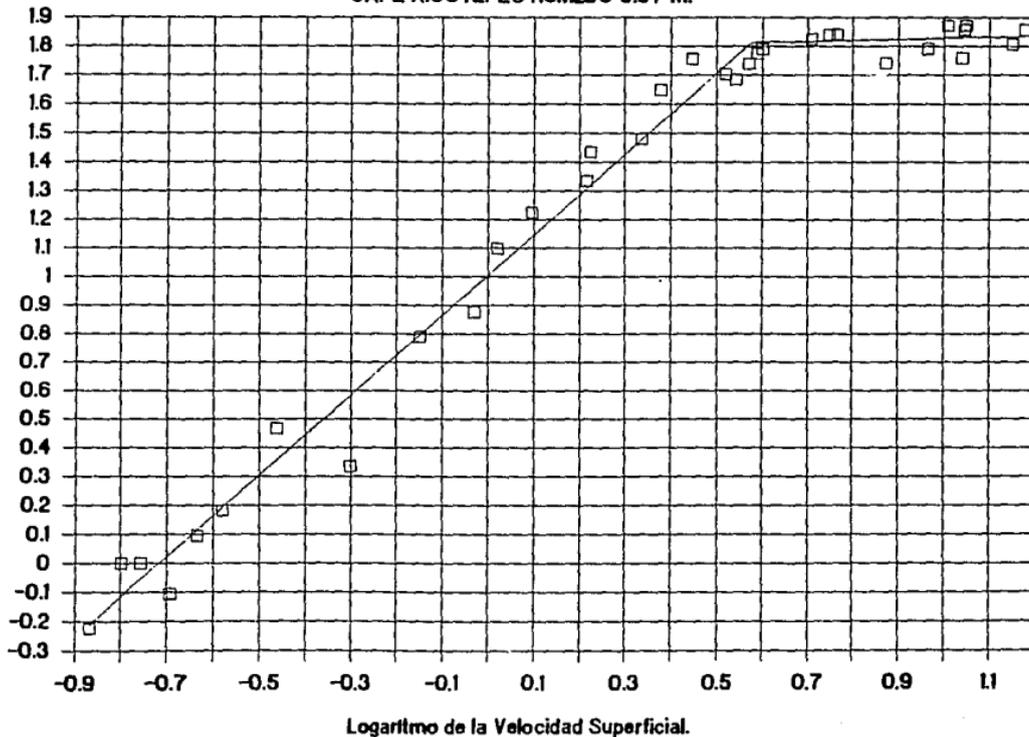
Logaritmo de la Caída de Presión.



Gráfica 27. PERFIL HIDRODINAMICO.

CAFE XICOTEPEC HUMEDO 0.07 m.

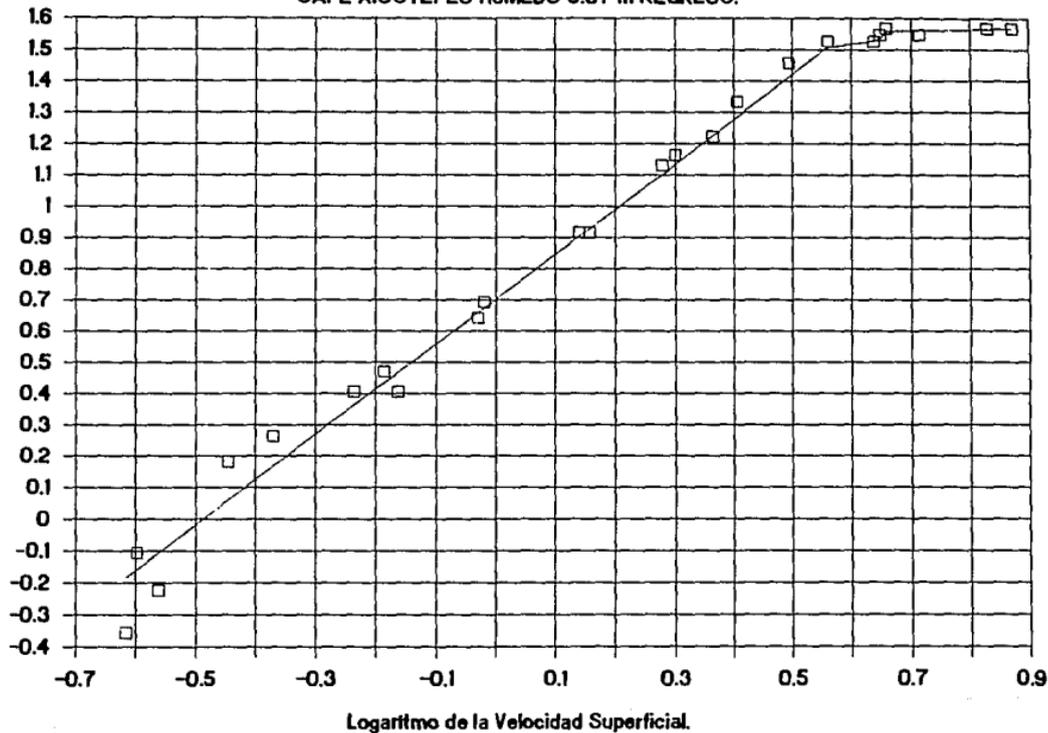
IV
Logaritmo de la Caída de Presión.



Gráfica 28. PERFIL HIDRODINAMICO.

CAFE XICOTEPEC HUMEDO 0.07 m REGRESO.

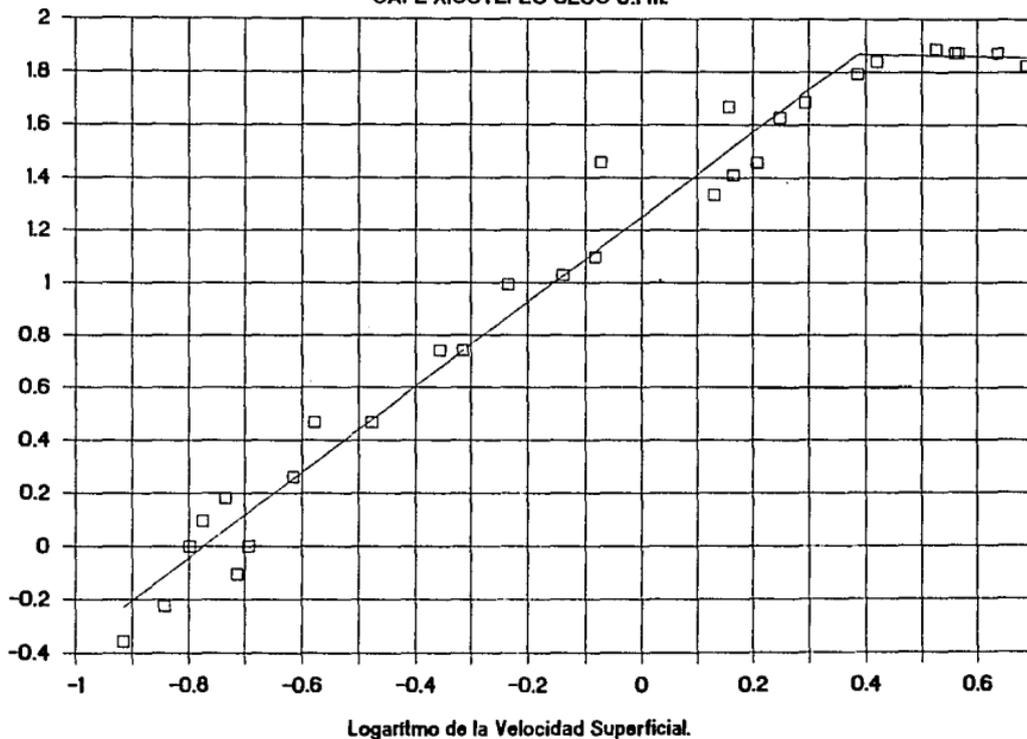
Logaritmo de la Caída de Presión.



Gráfica 29. PERFIL HIDRODINAMICO.

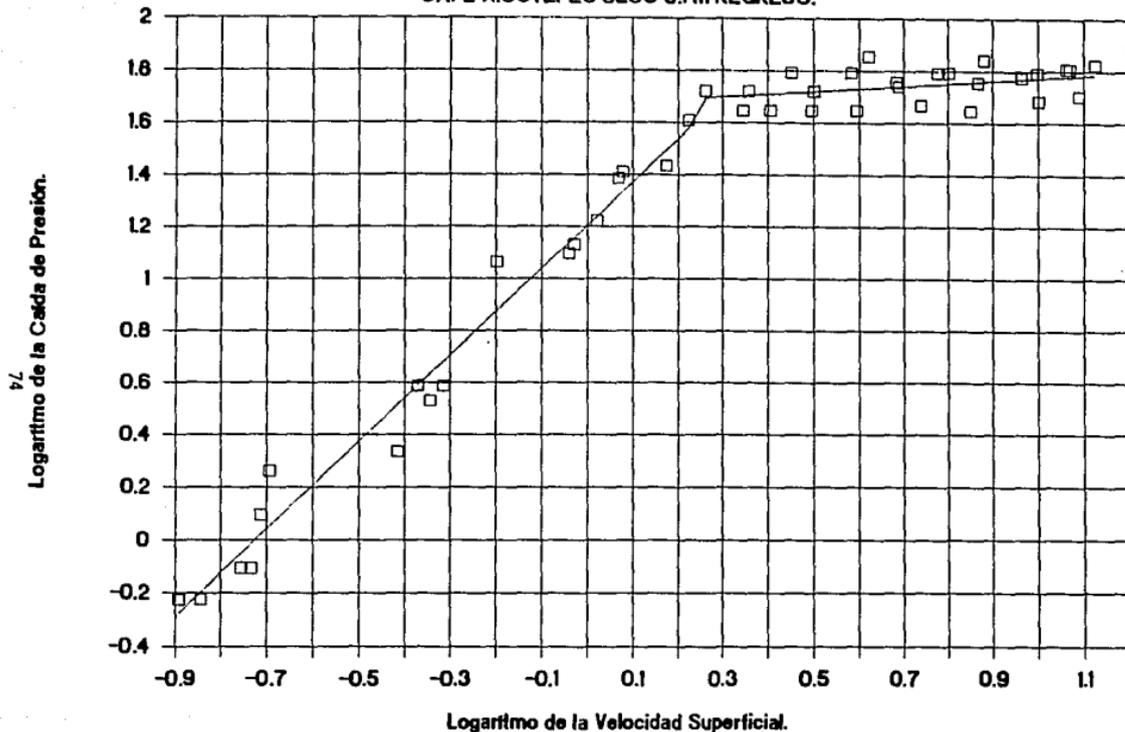
CAFE XICOTEPEC SECO 0.1 m.

72
Logartmo de la Caída de Presión.



Gráfica 30. PERFIL HIDRODINAMICO.

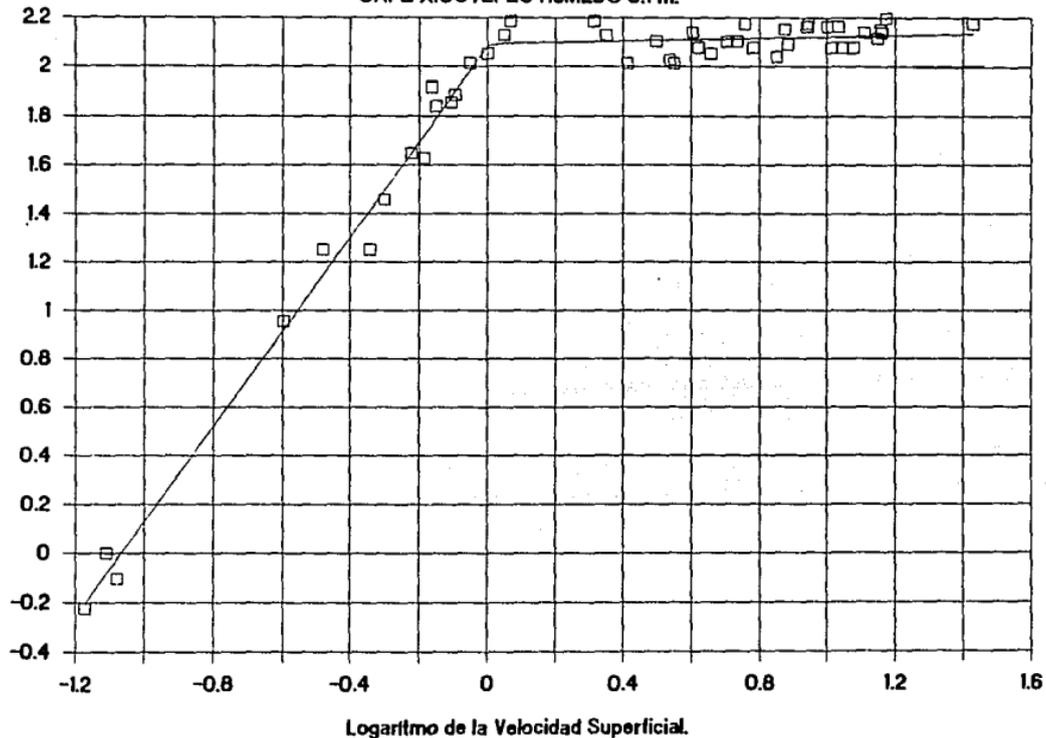
CAFE XICOTEPEC SECO 0.1 m REGRESO.



Gráfica 31. PERFIL HIDRODINAMICO.

CAFE XICOTEPEC HUMEDO 0.1 m.

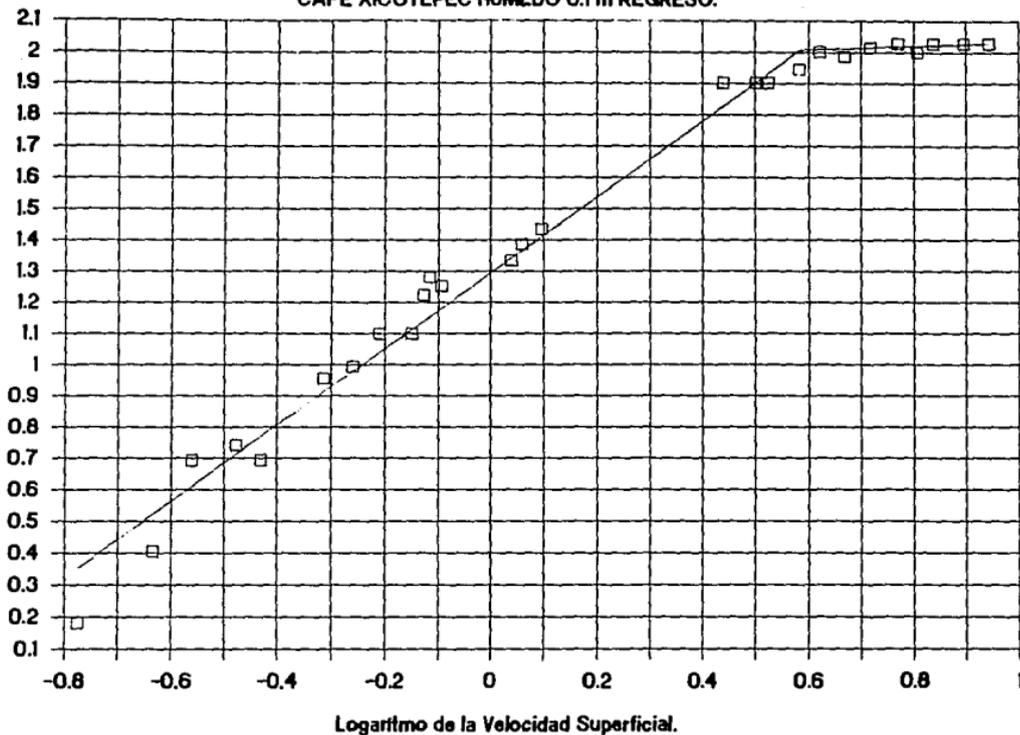
57
Logaritmo de la Caída de Presión.



Gráfica 32. PERFIL HIDRODINAMICO.

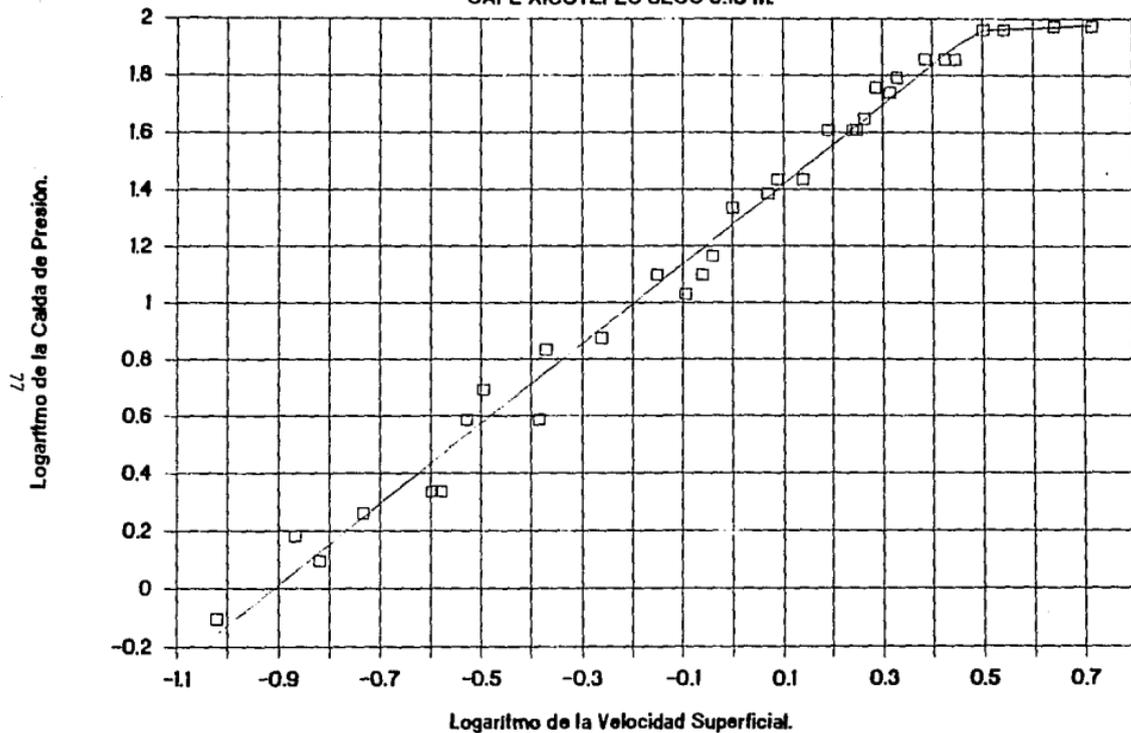
CAFE XICOTEPEC HUMEDO 0.1 m REGRESO.

76
Logaritmo de la Caída de Presión.



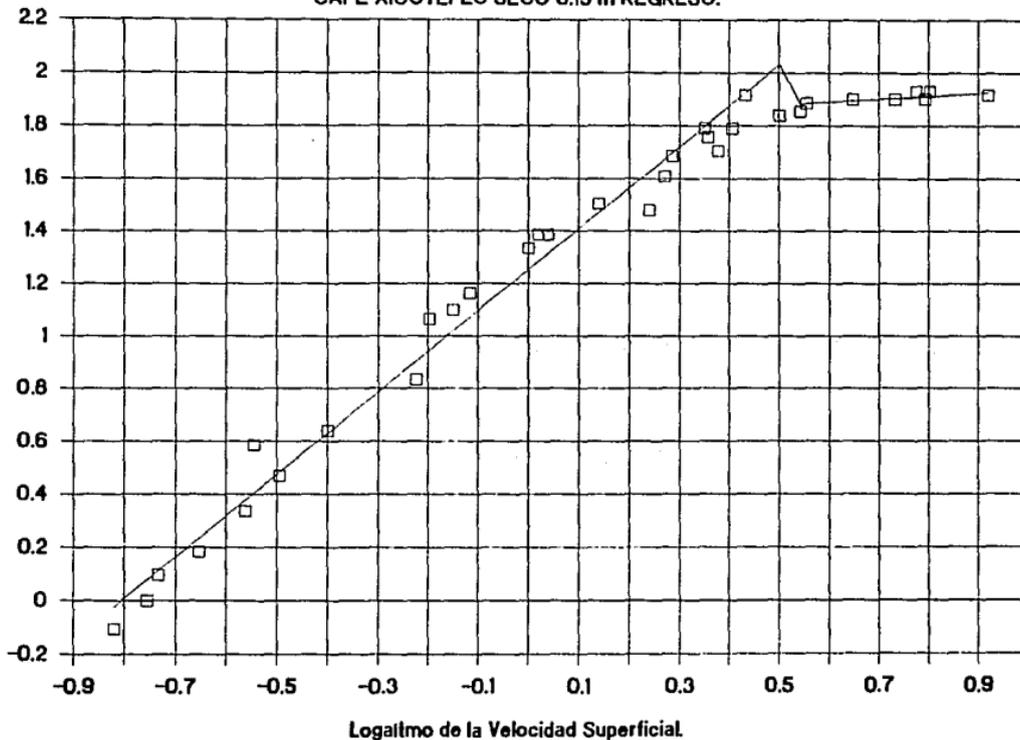
Gráfica 33. PERFIL HIDRODINAMICO.

CAFE XICOTEPEC SECO 0.13 m.



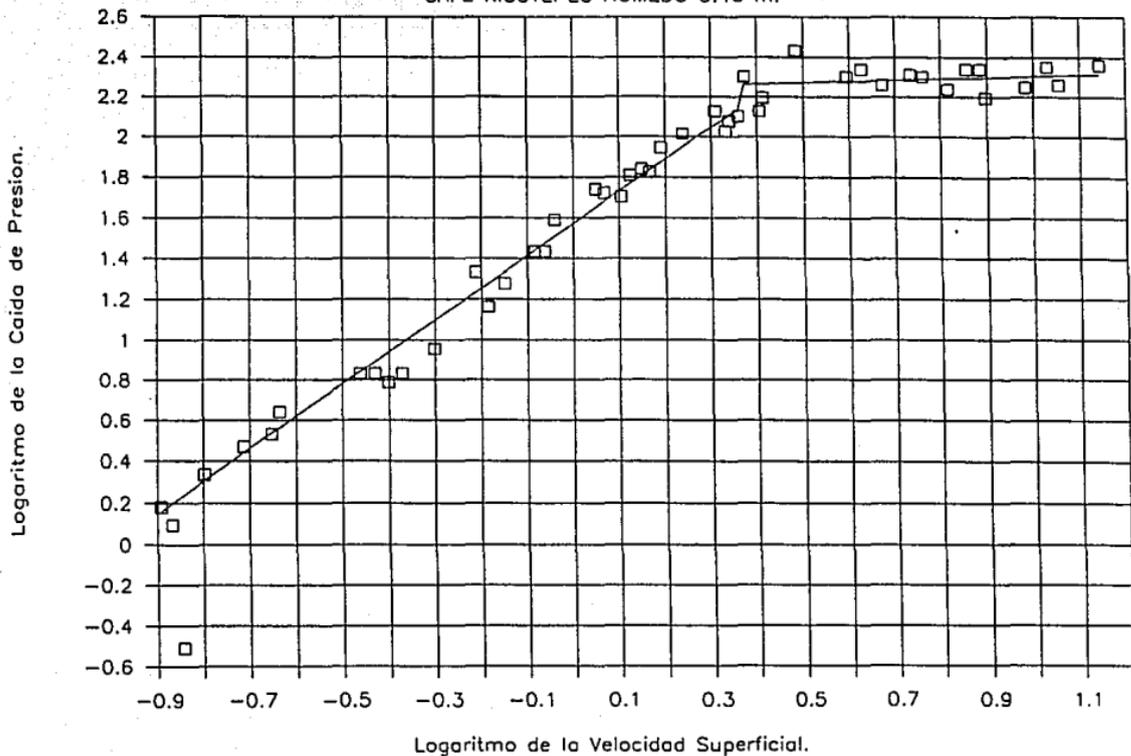
Gráfica 34. PERFIL HIDRODINAMICO.

CAFE XICOTEPEC SECO 0.13 m REGRESO.



Grafica 35. PERFIL HIDRODINAMICO.

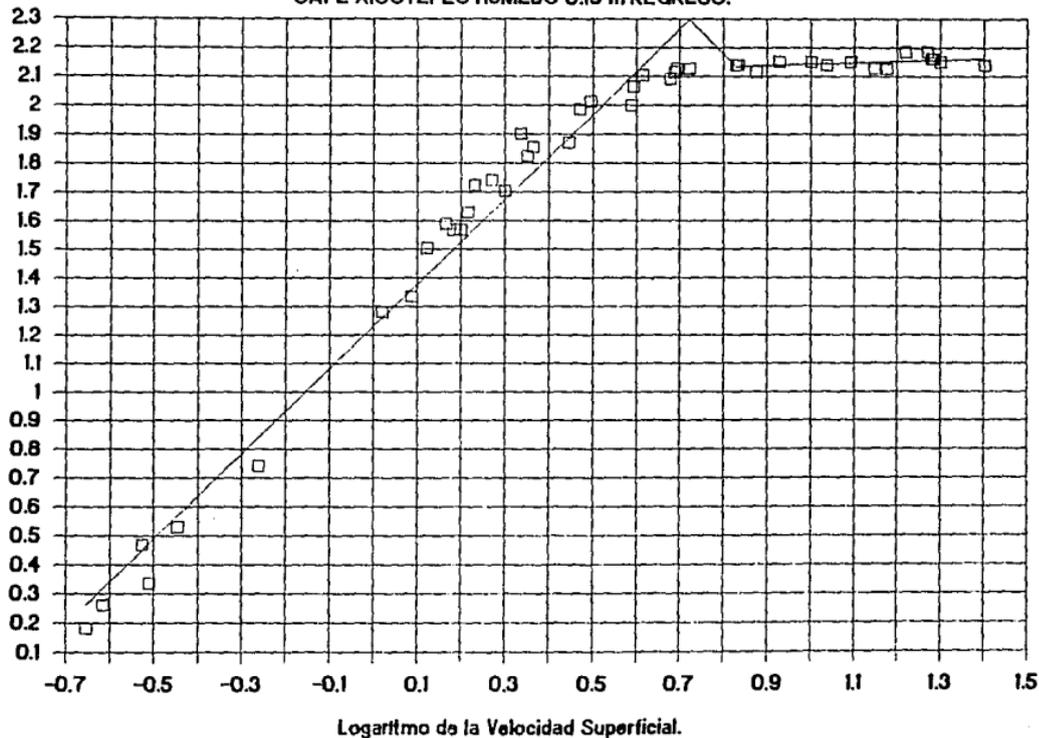
CAFE XICOTEPEC HUMEDO 0.13 m.



Gráfica 36. PERFIL HIDRODINAMICO.

CAFE XICOTEPEC HUMEDO 0.13 m REGRESO.

08
Logaritmo de la Caída de Presión.



CUADRO 3 VALORES DE Vmf Y Dp.

CLAVE	V(lda)	V(reg)	P(lda)	P(reg)
CAS7	2.07471	2.25298	5.18951	5.13066
CAH7	1.84465	1.91284	5.53909	4.64379
CAS10	1.71978	2.14722	4.52623	5.20837
CAH10	1.63567	2.16556	8.25242	7.31074
CAS13	2.05801	2.07129	8.13952	8.47139
CAH13	2.95685	2.05701	9.73126	8.19286
CHS7	2.19524	1.99282	5.59179	5.06983
CHH7	1.66207	1.95514	5.53874	4.66961
CHS10	2.17103	1.74943	7.72497	6.75363
CHH10	2.01755	2.07714	6.28387	6.3727
CHS13	2.01563	2.07011	8.12452	6.35737
CHH13	2.05586	2.31346	9.62049	8.36158
CXS7	1.95977	2.04566	5.13132	5.08878
CXH7	1.77524	1.81167	6.1195	4.74272
CXS10	1.46554	1.34468	6.4818	5.47023
CXH10	1.00481	1.79781	8.11497	7.44017
CXS13	1.62406	1.48477	7.08649	6.47615
CXH13	1.55157	1.83208	9.67812	8.37414

CUADRO 4. CARACTERISTICAS HIDRODINAMICAS.

REGION	Vmf ERGUN (m/s)	POROSIDAD (adimensional)
Atoyac	1.7468	0.3825
Huatusco	1.1324	0.2869
Xicotepec	1.7903	0.3876

Cuadro 5. NUMEROS ADIMENSIONALES.

REGION	N.FROUDE (PROMEDIO)	N.REYNOLDS (PROMEDIO)
Atoyac	6.751	1084.43
Huatusco	7.012	1040.08
Xicotepec	5.714	848.16

**CUADRO 6. ANALISIS DE VARIANZA MULTIVARIADA PARA LA
HIDRODINAMICA DEL CAFE EN LECHO FLUIDIZADO.**

FUENTES DE VARIACION	SUMA DE CUADRADOS	D.F	MEDIA CUADRADA	NIVEL DE SIGNIFICANCIA
EFECTO	.5637918	5	.1127584	.0696
ESTADO	.0336292	1	.0336295	.3918
REGION	.4866456	2	.2433228	.0160
ALTURA	.0435167	2	.0217584	.6005
RESIDUAL	.4905776	12	.0408815	
TOTAL (CORR.)	1.0543695	17		

CAPITULO 7.

CONCLUSIONES.

Las principales conclusiones que se pueden obtener de este estudio se muestran a continuacion:

1.- La esfericidad determinada para el café indica que se le puede manejar como esférico.

2.- Los valores promedio encontrados para la velocidad mínima de fluidización son los siguientes:

	IDA	REGRESO
Atoyac	1.8816	2.10225
Huatusco	2.0196	2.02635
Xicotepac	1.5635	1.71944

3.- Los valores encontrados experimentalmente, no se ajustan al modelo teórico propuesto por Ergun, por lo que se recomienda probar otros modelos.

4.- Los resultados de este trabajo son validos para el margen de condiciones manejado.

5.- Estadísticamente no se pueden comparar las diferentes regiones, ya que sus valores de V_{mf} , muestran diferencias significativas, por lo que se recomienda evaluar los parámetros de fluidización para regiones no incluidas en este estudio.

6.- El café de Huatusco es el que muestra un mayor tamaño, tanto en diámetro como en dimensiones, por lo que muestra una mayor resistencia al paso del aire, lo que hace que su velocidad de fluidización sea la más elevada.

7.- El valor de la porosidad para el café de Huatusco es muy elevado, lo cual indica que presenta mayores dificultades de empacamiento en el lecho y un menor ordenamiento de las partículas, esto puede deberse al tamaño del grano.

CAPITULO 8.

BIBLIOGRAFIA.

1.- Anaya, S.I.

CONTRIBUCION AL ESTUDIO DEL SECADO EN CHICHARO (*Pisum sativa*)
EN UN EQUIPO DE LECHO FLUIDIZADO.

Tesis M.en C., I.P.N., E.N.C.B. México, 1988.

2.- Brennan, V.G., Butters, J.R., Cowwell, N.D, y Lilly, A.E.U.

FOOD ENGINEERING OPERATIONS.

2a Ed. Applied Science Publ., Londres, 1976.

3.- Calderon, A.G.

MODELO MATEMATICO PARA LA SIMULACION DE UN REACTOR NO
CATALITICO DE LECHO FLUIDIZADO SOLIDO - GAS .

Tesis I.Q. Universidad Nacional Autonoma de México,
México, 1976.

4.- Coulson, J.M. y Richardson, J.F.

CHEMICAL ENGINEERING.

Vol. 2, 2a Ed., Pergamon Int. Londres, 1966.

5.- Csics, I.

THE FLUID-TRANSPORTATION OF FINISHED PRODUCTS BETWEEN FLOUR
MILL AND STORE.

Melomipar es Termenyforgalom 18, (6); 169-170, 1971.

6.- Escobar, C. E. P.

DISENO DE UN SECADOR SOLAR PARA CAFE EN GRAND.

Tesis D.F.B. Universidad La Salle, México, 1981.

7.- Felix, A.M.B., Robles, T.R.R., Santiago, P.T., y Viscarra, M.M.G.

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO HIDRODINAMICO DE CUBOS DE PAPA EN LECHO FLUIDIZADO.

La Agroindustria en México., U.A.Ch., Chapingo, México, 1977. México, 1

8.- Foust, A.S., Wenzel, L.A., Clump, C.W., Maus, L., y Andersen, L.B.

PRINCIPLES OF UNIT OPERATIONS.

2a. Ed. John Wiley and Sons. Nueva York, 1980.

9.- Gonzales, R.E.

TEMAS SELECTOS SOBRE EL APROVECHAMIENTO DE LOS RESIDUOS DEL BENEFICIO HUMEDO DEL CAFE.

Informe Técnico. Tesis. IBO. I.P.N. E.N.C.B. México, 1982.

10.- Gutiérrez, L.G.F.

A FUNDAMENTAL STUDY OF THE FLUIDIZED BED DRYING OF FOOD MATERIAL.

Thesis M.Sc. Reading University, England, 1981.

11.- Kunii, D., y Levenspiel, O.

FLUIDIZATION ENGINEERING.

2a. Ed. John Wiley and Sons, Inc. Nueva York, 1969.

12.- Leva, M.

FLUIDIZATON.

1a. Ed. Mc Graw Hill Int. St. Japón, 1979.

13.- Martin, W.H., Briley, G.C., y Pao, P.Y.

FLUIDIZED FREEZING.

Refrigeration Engineering Corp.

United States Patent 4 281 521. 1981.

- 14.- Martínez, E.
BENEFICIO DEL CAFE.
Comunicación Personal. Xicotepec, Pue., 1989.
- 15.- Mendoza, J.O.
ESTUDIO DEL FENOMENO DE LA FLUIDIZACION EN CHICHAROS.
Tesis. IBQ. I.P.N. E.N.C.B. México, 1983.
- 16.- Mc Cabe, W.L., y Smith, C.J.
UNIT OPERATIONS OF CHEMICAL ENGINEERING.
3a. Ed. Mc Graw Hill Int. St. Japón, 1979.
- 17.- Mc Cune, K.L., y Wilhelm, R.J.
MASS AND MOMENTUM TRANSFER IN SOLID - LIQUID SYSTEM (FIXED AND FLUIDIZED BEDS).
Industrial and Engineering Chemistry, 41, (6):1124 -1124, 1949.
- 18.- Noshenin, N.N.
PHYSICAL PROPERTIES OF PLANT AND ANIMAL MATERIALS.
2a. Ed. Gordon and Breach Sci. Publishing. London, 1970.
- 19.- Nielsen, R.H.
PARTICLE MIXING AND CIRCULATION IN GAS FLUIDIZED BEDS OF FLOUR AND STARCH.
Dissertation Abstracts Int. 25, (8): 75-82, 1975.
- 20.- Nolasco, M.
CAFE Y SOCIEDAD EN MEXICO.
Centro de Ecodesarrollo, 454 p. México, 1985.
- 21.- Orellana, R.R.
INFLUENCIA DE LAS IMPERFECCIONES EN EL RENDIMIENTO Y NORMALIZACION DEL CAFE VERDE (Var. arábica).
Tesis. D.F.B. Universidad Autonoma de México. México, 1988.

22.- Perez, S.O.

BENEFICIO DEL CAFE.

Comunicación Personal. Xicotepec, Pue., 1989.

23.- Salek, J., y Villota, R.

A COMPARATIVE STUDY OF WHIRLING AND CONVENTIONAL FLUIDIZED BEDS IN THEIR APPLICATIONS TO DEHYDRATION. I. HEAT AND MASS TRANSFER ANALYSIS.

J. of Food Process and Preservation 2:73-98 , 1984.

24.- Saick, J., Hawkes, J.G., y Villota R.

A COMPARATIVE STUDY OF WHIRLING AND CONVENTIONAL FLUIDIZED BEDS IN THEIR APPLICATIONS TO DEHYDRATION. II. ANALYSIS OF RESIDENCE TIME, DISTRIBUTIONS AND QUALITY OF THE PROCESSED PRODUCTS.

J. of Food Process and Preservation 2:99-114 , 1984.

25.- Simon, E.J.

FLUIDIZED BED AGLOMERATION FOR INSTANT PRODUCTS.

Aeromatic. A.G., Switzerland, 76.(3):76-82. 1976.

26.- Treval, E.R.

MASS TRANSFER OPERATIONS.

3a Ed. Mc Graw Hill Chemical Eng. Series. Nueva York. 1974.

27.- Valero, R.J.

SUMARIO ESTADISTICO.

In.Comercio Exterior. 38 (2):179-183. México 1989.

28.- Vanecek, V., Markvarm, M., y Drobobor, R.

FLUIDIZED BED DRYING.

Leonard Hill Books. Londres, 1966.

29.- Vasil'Eva, T.K.

HIGH PRESSURE PNEUMATIC TRANSPORTATION OF GRANULATED SUGAR.

Sakhar'naya Promyshlennost', 48(7):15-21, 1974.

30.- Villaseñor, L.A.

CAFFICULTURA MODERNA EN MEXICO.

ASCA, 469p.y anexo. Chapingo, México. 1965

31.- Yamadat, T., y Kiyama, K.

OPERATIONS OF DRYING, ROASTING AND SALT COATING OF SESAME SEEDS IN A FLUIDIZED BED.

J. of the Agricultural Chemical Society of Japan.

51(5):327-329, 1977.

32.- Zavaleta, R. M.

EFFECTO DE LAS CONDICIONES DE PROCESO EN EL ASPECTO DEL CAFE SOLUBLE.

tesis IQ. Universidad Autonoma de México. México. 1973.