

IICA
F01
33

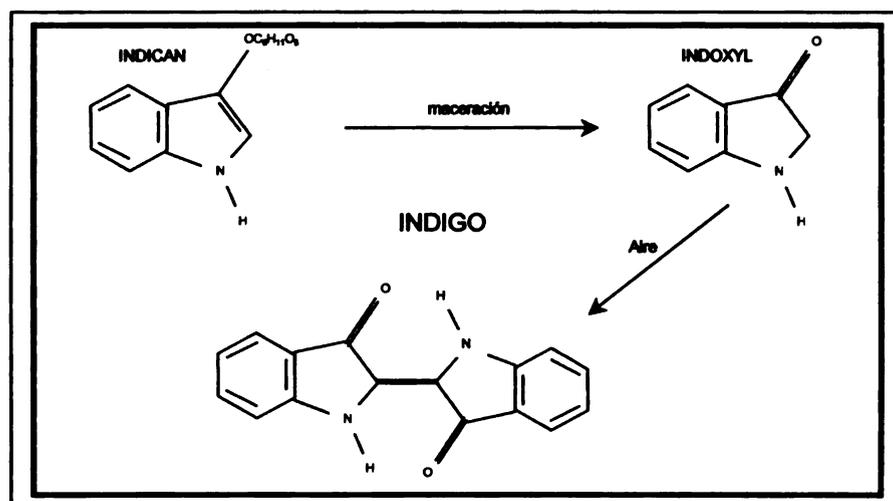


INSTITUTO INTERAMERICANO DE COOPERACIÓN
PARA LA AGRICULTURA

IICA

PROYECTO
MODERNIZACIÓN DEL PROCESAMIENTO DEL AÑIL EN
EL SALVADOR

CONSULTORÍA
DISEÑO DE INGENIERÍA DE UNA PLANTA PILOTO
PARA EL PROCESAMIENTO DEL AÑIL



Elaborado por

José Francisco Zuleta Morataya
Fernando Teodoro Ramírez Zelaya
Rafael Arturo Rodríguez Córdova

El Salvador, Agosto de 2003

00006669

IIA
FOI
33



Introducción

Desde la época de la colonia y con la modificación hecha por los españoles, el proceso de extracción del colorante de añil a partir de la planta de Jiquilite no ha cambiado considerablemente. En todos los procesos se identifican las etapas de corte, maceración, mezclado, sedimentado y secado.

Con el ánimo de reducir tiempos y esfuerzos, en el mezclado se han utilizado diversos métodos: desde los pies de los esclavos hasta la recirculación del agua-colorante por medios mecánicos. De igual forma, entre el sedimentado y el secado se incluye el filtrado para eliminar la mayor cantidad de agua y reducir el tiempo de su eliminación.

Como resultado de las investigaciones bibliográficas, se ha determinado que el jiquilite contiene un glucósido natural incoloro que se llama indican. Por la maceración con el agua, ese glucósido se hidroliza; es decir, libera indóxico que al exponerse al aire se oxida y se vuelve insoluble, produciéndose así la indigotina de color azul.

Con lo anterior se confirma que las características físico-químicas en las diversas etapas del proceso cambian y deben ser tales que determinen la calidad del colorante.

Presentar una propuesta de Diseño de una Planta Piloto para el Procesamiento del Añil, que sea técnica y económicamente factible, será producto de una ardua investigación. En todo diseño, existen muchas variables que se involucran en el proceso que, al final, pueden presentar más de una alternativa. Para lograr los beneficios esperados, la selección del diseño dependerá de su costo y de la cantidad de producto a procesar.



Objetivos

General

Diseñar una Planta Piloto para el Procesamiento del Añil que sea técnica y económicamente factible de construir.

Específicos

- Estudiar el proceso actual de extracción del añil para identificar las variables que inciden en la calidad y cantidad de colorante a obtener.
- Identificar las características físico-químicas en las diferentes etapas del proceso
- Hacer los ensayos correspondientes para verificar el efecto de las variables en las características físico-químicas de las diferentes etapas del proceso.
- Conocer las cantidades de producción óptima por manzana de plantación.
- Definir volúmenes de producción de la planta de añil para que la planta piloto no sea subutilizada.
- Diseñar los componentes de la planta piloto de tal manera que mejoren los procesos en cada etapa en cuanto a calidad, tiempo y rendimiento.
- Definir el procedimiento de operación de la planta piloto.
- Establecer el plan de mantenimiento preventivo a efectuar en la planta piloto.
- Elaborar un documento para la divulgación del proceso.



I Metodología de la Investigación

El objeto de la investigación en el presente proyecto, es el obtener información detallada de las diferentes etapas del proceso de extracción del afil: identificar, calificar y cuantificar el efecto de los factores y variables que puedan tener una influencia significativa en el proceso, además del efecto de la adición de otras variables, los métodos de extracción utilizados en el país como en diferentes partes del mundo, entre otras. Toda la base de datos será sustentada por la investigación bibliográfica, investigación vía Internet e investigación de campo.

Para definir una propuesta de **Diseño de una Planta Piloto para el Procesamiento del Afil**, se evaluarán las variables y se harán, en lo posible, los ensayos correspondientes, con base en la optimización de la producción; es decir, tiempos en el proceso, costos de inversión y cantidad y calidad del producto.

Para una mejor claridad del proceso de investigación, en el diagrama de la figura 1 que a continuación de detalla, se especifican las etapas.



METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACION

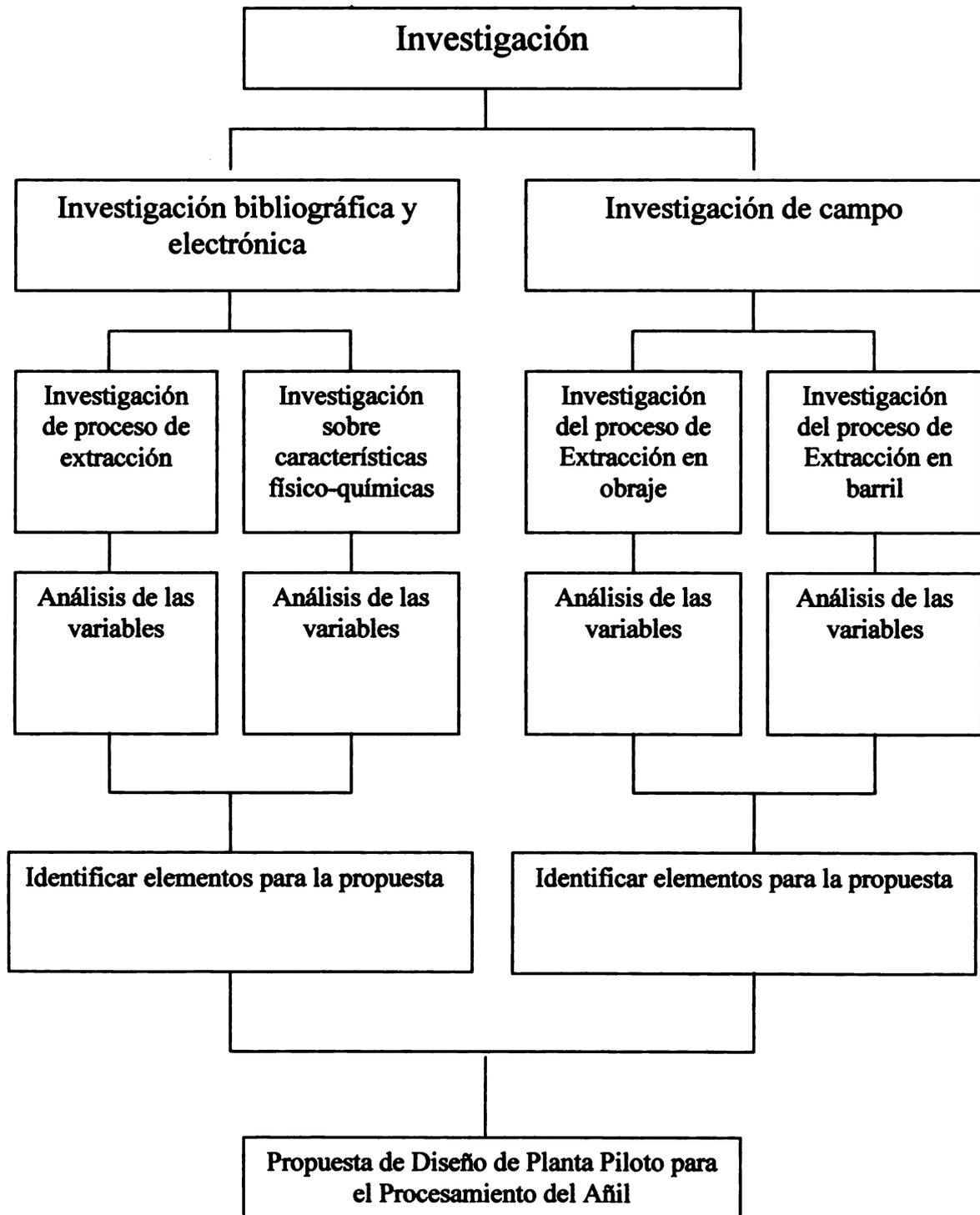


Fig. 1. Diagrama del proceso de investigación utilizado.



II Descripción del proceso actual

Un obraje es una fábrica para procesar eficazmente el Jiquilite y producir la mayor cantidad con la mayor calidad posible de tinte. Está compuesto de una o dos pilas para el remojo, donde las plantas permanecen sumergidas en agua; una o dos pilas de batido, donde se agita el agua mezclada con el colorante para que el producto, en forma de pasta, se deposite en el fondo. Luego se separa el agua y se extrae la pasta y se seca para obtener el polvo. El tamaño de las pilas dependerá de la cantidad de material a procesar y su forma puede ser rectangular o circular. (1)



Fig. 2. Pila de forma circular.



Fig. 3. Pila de forma rectangular.



Sin embargo, existe la alternativa de sustituir las pilas por barriles con el objeto de reducir los costos iniciales de inversión. Lógicamente, las cantidades a procesar serán mucho menores y no se asegura que la calidad se mantenga o se mejore.

Fig. 4. Sustitución de barril por pila

Corte de la planta

Aunque en tiempos de la colonia y en algunas regiones del mundo, se evidencia que el corte se efectúa con cuma o machete (ver Fig. 5); en la actualidad, algunos productores lo hacen con alicate para podar y justo en el tallo a la altura donde comienza la ramita de hoja (ver Fig. 6). El corte con machete implícitamente produce un golpe que daña la raíz, posibilitando así la muerte prematura de la planta. Por la característica y variedad de la planta, difícilmente se pueden realizar más de tres cortes por año y no más de tres años de producción.



Fig. 5. Corte de la planta con machete





Fig. 6. Corte de planta con alicate a la altura de la hoja.

En época de invierno, del peso total de la planta (tallo-hoja), el porcentaje de peso de hoja es del 60%, aproximadamente. La característica de la hoja en esa época es de buen tamaño y muy húmeda. En tanto que en época de verano, el peso de la hoja alcanza el 30% aproximadamente, evidenciándose una hoja pequeña con muestra de deshidratación.

Cortada la planta se forman manojos para determinar su peso y luego son colocados en la pila de remojo.

El tiempo requerido para el corte y traslado a la pila depende de la cantidad a procesar y de la distancia desde la zona de cultivo al obraje.

Remojo en Agua

A esta etapa se conoce también como maceración o fermentación. Simplemente consiste en reposar la planta en agua por aproximadamente 16 horas. Debe asegurarse que la planta quede inmersa en el agua. En algunos obrajes utilizan la picadora de zacate para cortar el tallo-hoja y lograr colocar más producto en la pila. Esto no hace cambiar en lo absoluto el porcentaje de hoja. El mismo procedimiento se aplica en los barriles.

No obstante, el objetivo de esta etapa es extraer el colorante (forma intermedia) de la hoja ; es decir, liberar el indican. Dependiendo de la calidad de la hoja; es decir, si es de invierno o de verano, el tiempo de este proceso puede oscilar entre 12 y 16 horas. Con más tiempo, el proceso llega a la descomposición de la mezcla del líquido, lo que podría perjudicar en la cantidad y calidad del colorante.

Para el mejor aprovechamiento y conservación de la materia prima del recurso, tanto las pilas como los barriles se ubican cerca de los cultivos de la planta y de fuentes de agua (nacimientos, pozos, tanques o suministro de agua potable).

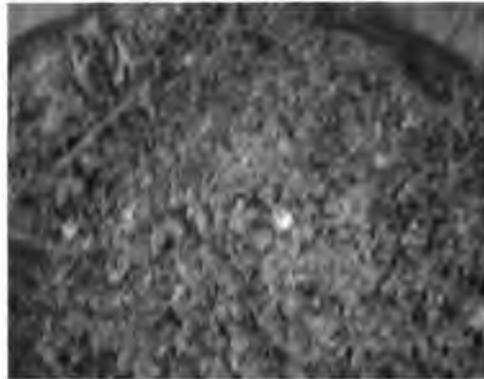


Fig. 7. Maceración de la hoja en agua.
Obsérvese el color azul.

Mezclado de líquido (Oxigenado)

El objetivo fundamental es la de oxigenar la mezcla agua-colorante para formar el ingrediente activo del colorante, la indogotina, por lo tanto esta es una etapa clave. Se han utilizado innumerables métodos, de los cuales se mencionan los siguientes:

- Mezcla directa de los esclavos a través de sus pies



- Mezcla con paletas de diferentes formas con movimiento recíproco en línea recta, movimiento en círculos o giratorios.
- Hacer girar una rueda de paletas en la mezcla
- Reciclar la mezcla con bomba accionada por motor de combustión o eléctrico
- Reciclar la mezcla con bomba y hacerla caer a la pila a cierta altura



Fig. 8. Oxigenación con paletas con movimiento circular



Fig. 9. Oxigenación con paletas con movimiento recíproco en línea recta

Un aspecto importante a señalar es la cantidad de espuma que se puede producir por la reacción química del líquido ante la presencia del oxígeno. Una vez completada la reacción química, deja de producirse la espuma y el remanente debe desaparecer.



El tiempo que se requiere para oxigenar la mezcla oscila entre 60 y 120 minutos, dependiendo del método y el volumen de agua..

Sedimentado

Finalizada la etapa de oxigenación, la mezcla se deja en reposo por 24 horas aproximadamente, tiempo en el cual se estima que la mayor parte del colorante se sedimenta y se ha depositado en el fondo.

Fig. 10. Extracción de la pasta sedimentada

Filtrado

En el sedimentado, después de evacuar el agua, el colorante se deposita en una tela de algodón (manta) para reducir en lo posible, la cantidad de agua y obtener así una pasta más consistente. El proceso de reposo requiere de 24 horas.

Fig.11. Filtrado en mantas colocadas en canastas.

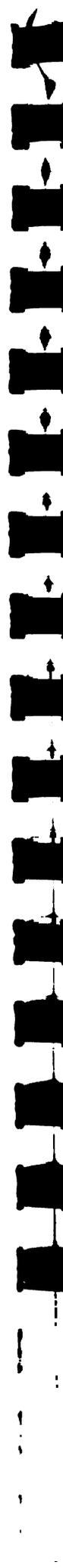




Fig. 12. Filtrado en mantas colocadas en marcos rectangulares.

Secado

Algunos productores, después de recolectar la pasta en las mantas, la hacen calentar en recipientes a una temperatura de 60° C por el término de 1 hora. El objeto es reducir, aún más, la cantidad de agua. Es una etapa de mucho cuidado, puesto que la pasta debe removerse constantemente para evitar que se queme y producir así cenizas, repercutiendo en la calidad del colorante.



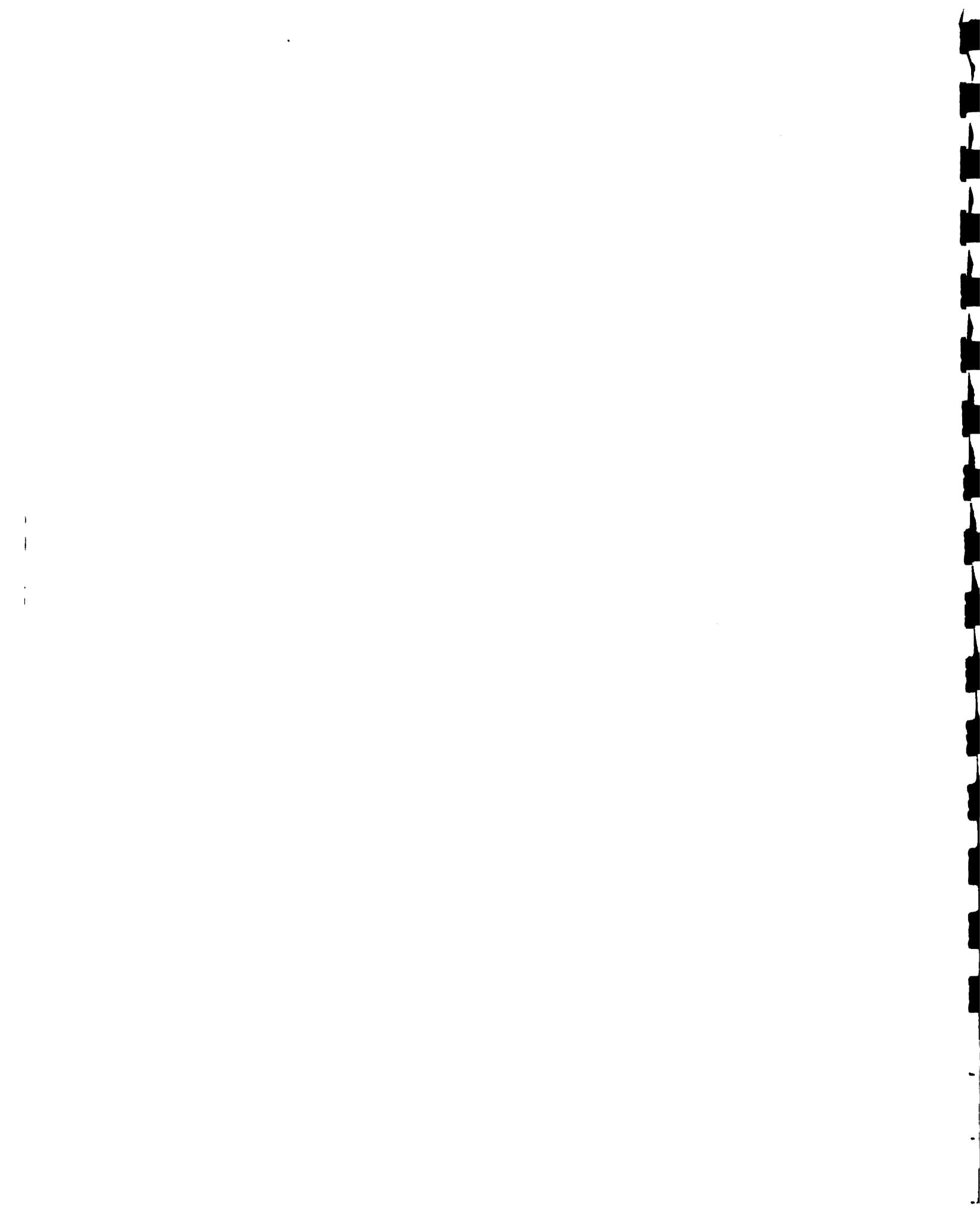


Fig. 13. Cocción de la pasta para la eliminación de agua

Posteriormente, se traslada a lugar abierto para secarse completamente, en un tiempo que oscila entre 30 a 40 horas efectivas al sol.



Fig. 14. Secado en bandejas.



Fig. 15. Secado de la pasta en plásticos.

III Análisis de las Variables

El componente principal del índigo natural es la indigotina, de la cual el colorante contiene del 70% al 90% las mejores clases, del 40 al 50% las medianas y un 20% las inferiores. Los



componentes restantes son el rojo de índigo (indirrubina), el pardo de índigo, cola de índigo, agua y cenizas que consisten principalmente en carbonatos de calcio y de magnesio, alúmina y óxido de hierro. Por lo tanto, una de las variables respuestas del proceso a registrar será el contenido de indigotina del añil extraído, ya que la buena calidad de un índigo depende exclusivamente de ésta variable. (2)

Los efectos más significativos sobre el contenido de indigotina son:

- Volumen de agua.
- Tipo, calidad y cantidad de hoja.
- El factor tiempo y forma de oxigenación. En esta etapa se presenta el verdadero proceso de reacción química y la precipitación del polvo.

Volumen de agua

El volumen de agua presenta una tendencia a aumentar el porcentaje de indigotina cuando sus niveles con respecto al peso de la hoja son bajos. Según resultados de laboratorio, el mínimo de volumen de agua en mililitros corresponde a la relación 1:20 con respecto al peso de la hoja en gramos (50 gr. de hoja: 1,000 ml H₂O) (2).

Sin embargo, según el proceso real, para un peso de planta (hoja y tallo) de 675 lb. el volumen de agua utilizada fue de 1,830 lt, lo que hace una relación de 1:06 entre el peso en gramos de la planta y el volumen en mL del agua. No obstante, si el peso de la hoja es del 60% del peso total de la planta en época de invierno, la relación peso de hoja-volumen de agua sería de 1:10. En época de verano, se tendría una relación de 1:19.

Tabla 1. Relación peso de planta-volumen de agua

Peso de planta	Volumen de agua		Relación	Relación
675 lb.	1,830 L.	484 G	50 g: 295 mL. (1 : 06)	1.40 lb. : 1 G



Sin embargo, en los ensayos del proceso sólo con hoja realizados en pilas, los pesos y los volúmenes de agua que se utilizaron, en libras y galones respectivamente, fueron los siguientes:

Table 2. Relación peso de hoja-volumen de agua en época de inicio de invierno

Peso de planta	Peso de hoja	Porcentaje hoja	Volumen de agua	Relación Hoja en lb. : Agua en G
402 lb.	170 lb.	42.3 %	180 galones	1.00 = 1.06
422 lb.	180 lb.	42.6 %	180 galones	1.00 = 1.00

Tabla 3. Relación peso de hoja-volumen de agua en época de invierno

Peso de planta	Peso de hoja	Porcentaje hoja	Volumen de agua	Relación Hoja en lb. : Agua en G
634 lb.	402 lb.	63.4 %	180 galones	2.23 = 1.00
644 lb.	422 lb.	65.5 %	180 galones	2.34 = 1.00
150 lb.	103 lb.	68.7 %	40 galones	2.57 = 1.00
150 lb.	88 lb.	58.7 %	34 galones	2.58 = 1.00

En los ensayos realizados en tanques utilizando sólo hoja con ramas medianas, los resultados fueron los siguientes:

Tabla 4. Relación peso de hoja- volumen de agua para época de invierno

Peso de planta	Peso de hoja	Porcentaje hoja	Volumen de agua	Relación Hoja en lb. : Agua en gl.
1383 lb	881 lb	63.7 %	439 G	2.00 = 1.00
1013 lb	691.5 lb	68.3 %	439 G	3.34 = 1.00

Tipo y calidad de hoja

1
2
3



En el efecto del tipo de hoja, el porcentaje máximo de índigotina se logra con la hoja fresca, característica que se presenta en invierno. No obstante, las figuras 16 y 17 muestran los resultados del trabajo en laboratorio, las cuales indican el contenido de índigotina según la edad y posición de la hoja en la planta (planta *Polygonum tinctorium*)(3).

En la figura 16, el valor de cero días indica la primera exposición de la semilla al agua en ausencia de luz. Después de que las raíces aparecieron (día 3), el crecimiento de las plantas se efectuó utilizando luz fluorescente. Antes de los ocho días de crecimiento, no se puede detectar indican. Es hasta que se desarrolla las hojas cuándo se le detecta. Las barras representan promedios de 5 determinaciones, (planta *Polygonum tinctorium*)(3).

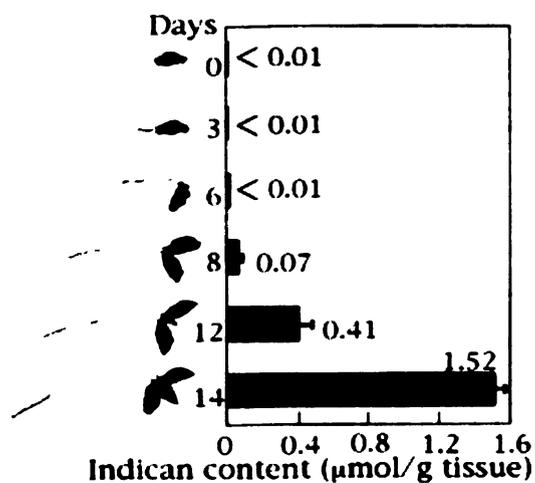


Fig. 16. Cambio en el contenido de indican en toda la planta durante la germinación.



Fig. 13. Cocción de la pasta para la eliminación de agua

Posteriormente, se traslada a lugar abierto para secarse completamente, en un tiempo que oscila entre 30 a 40 horas efectivas al sol.



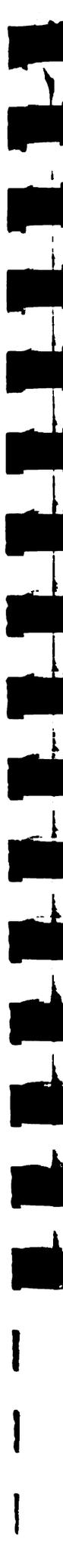
Fig. 14. Secado en bandejas.



Fig. 15. Secado de la pasta en plásticos.

III Análisis de las Variables

El componente principal del índigo natural es la indigotina, de la cual el colorante contiene del 70% al 90% las mejores clases, del 40 al 50% las medianas y un 20% las inferiores. Los



componentes restantes son el rojo de índigo (indirrubina), el pardo de índigo, cola de índigo, agua y cenizas que consisten principalmente en carbonatos de calcio y de magnesio, alúmina y óxido de hierro. Por lo tanto, una de las variables respuestas del proceso a registrar será el contenido de índigotina del añil extraído, ya que la buena calidad de un índigo depende exclusivamente de ésta variable. (2)

Los efectos más significativos sobre el contenido de índigotina son:

- Volumen de agua.
- Tipo, calidad y cantidad de hoja.
- El factor tiempo y forma de oxigenación. En esta etapa se presenta el verdadero proceso de reacción química y la precipitación del polvo.

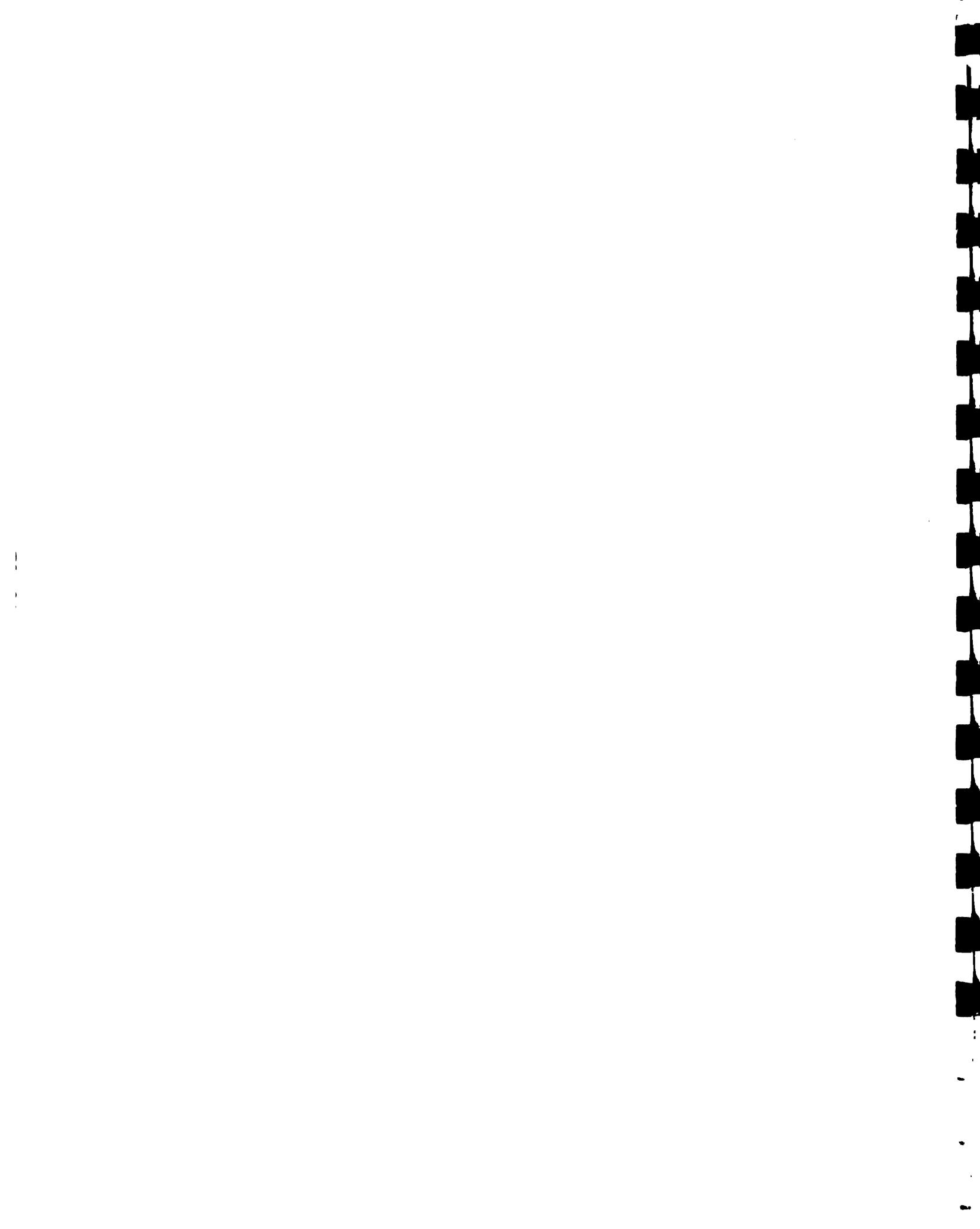
Volumen de agua

El volumen de agua presenta una tendencia a aumentar el porcentaje de índigotina cuando sus niveles con respecto al peso de la hoja son bajos. Según resultados de laboratorio, el mínimo de volumen de agua en mililitros corresponde a la relación 1:20 con respecto al peso de la hoja en gramos (50 gr. de hoja: 1,000 ml H₂O) (2).

Sin embargo, según el proceso real, para un peso de planta (hoja y tallo) de 675 lb. el volumen de agua utilizada fue de 1,830 lt, lo que hace una relación de 1:06 entre el peso en gramos de la planta y el volumen en mL del agua. No obstante, si el peso de la hoja es del 60% del peso total de la planta en época de invierno, la relación peso de hoja-volumen de agua sería de 1:10. En época de verano, se tendría una relación de 1:19.

Tabla 1. Relación peso de planta-volumen de agua

Peso de planta	Volumen de agua		Relación	Relación
	675 lb.	1,830 L.	484 G	50 g: 295 mL. (1 : 06)



Sin embargo, en los ensayos del proceso sólo con hoja realizados en pilas, los pesos y los volúmenes de agua que se utilizaron, en libras y galones respectivamente, fueron los siguientes:

Tabla 2. Relación peso de hoja-volumen de agua en época de inicio de invierno

Peso de planta	Peso de hoja	Porcentaje hoja	Volumen de agua	Relación Hoja en lb. : Agua en G
402 lb.	170 lb.	42.3 %	180 galones	1.00 = 1.06
422 lb.	180 lb.	42.6 %	180 galones	1.00 = 1.00

Tabla 3. Relación peso de hoja-volumen de agua en época de invierno

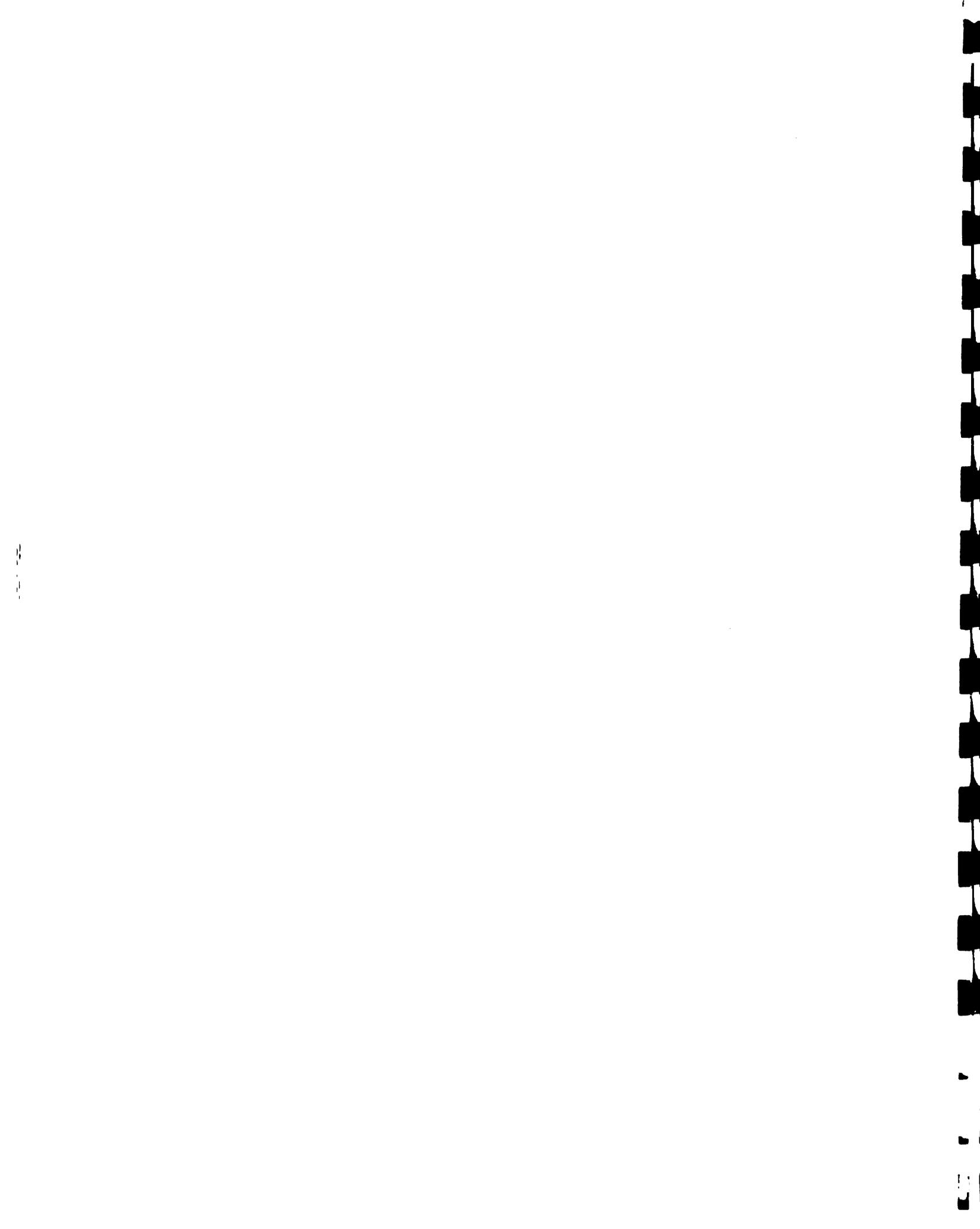
Peso de planta	Peso de hoja	Porcentaje hoja	Volumen de agua	Relación Hoja en lb. : Agua en G
634 lb.	402 lb.	63.4 %	180 galones	2.23 = 1.00
644 lb.	422 lb.	65.5 %	180 galones	2.34 = 1.00
150 lb.	103 lb.	68.7 %	40 galones	2.57 = 1.00
150 lb.	88 lb.	58.7 %	34 galones	2.58 = 1.00

En los ensayos realizados en tanques utilizando sólo hoja con ramas medianas, los resultados fueron los siguientes:

Tabla 4. Relación peso de hoja- volumen de agua para época de invierno

Peso de planta	Peso de hoja	Porcentaje hoja	Volumen de agua	Relación Hoja en lb. : Agua en gl.
1383 lb	881 lb	63.7 %	439 G	2.00 = 1.00
1013 lb	691.5 lb	68.3 %	439 G	3.34 = 1.00

Tipo y calidad de hoja



En el efecto del tipo de hoja, el porcentaje máximo de índigotina se logra con la hoja fresca, característica que se presenta en invierno. No obstante, las figuras 16 y 17 muestran los resultados del trabajo en laboratorio, las cuales indican el contenido de índigotina según la edad y posición de la hoja en la planta (planta *Polygonum tinctorium*)(3).

En la figura 16, el valor de cero días indica la primera exposición de la semilla al agua en ausencia de luz. Después de que las raíces aparecieron (día 3), el crecimiento de las plantas se efectuó utilizando luz fluorescente. Antes de los ocho días de crecimiento, no se puede detectar indican. Es hasta que se desarrolla las hojas cuándo se le detecta. Las barras representan promedios de 5 determinaciones, (planta *Polygonum tinctorium*)(3).

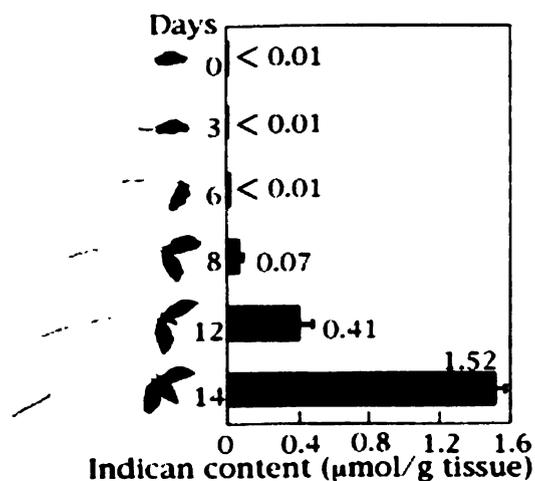


Fig. 16. Cambio en el contenido de indican en toda la planta durante la germinación.

1
1

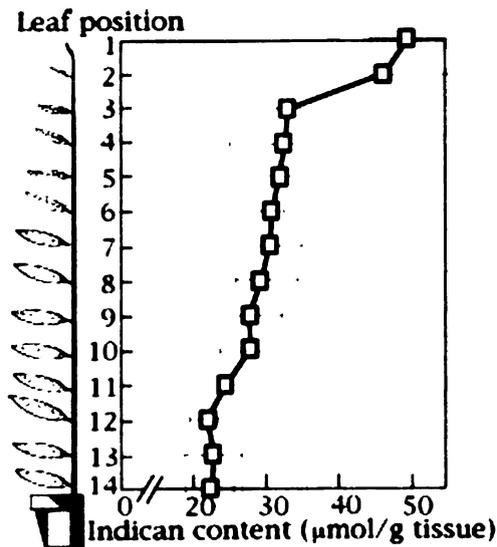


Figura 17. Distribución del contenido de indican como una función de la posición de la hoja.

En la figura 17 muestra que en la planta madura, son las hojas más jóvenes la que presentan mayor contenido de indican; la primera y segunda hoja desde el tope son las que tienen mayor contenido. Los valores presentados son promedios de 5 experimentos (planta *Polygonum tinctorium*).

Los estudios realizado por Minami en la variedad de *Polygonum tinctorium*, muestra que el contenido de indican se acumula en las hojas de la planta y no en los otros tejidos, entiéndase estos como flores, raíces, tallos o semillas. Los datos son los siguientes:

Hoja	32.3 pmol por mg. de tejido
Otros tejidos	0.1 pmol por mg. de tejido

En el mismo estudio se determinó que el indican se encuentra dentro de los protoplastos y vacuolas de las células, fenómeno que se muestra en la Fig. 18. La fotografía A, C y D muestran los protoplastos de las hojas. La fotografía B muestra una vacuola saliendo del protoplastos de la hoja. La fotografía E muestra el protoplastos del tallo. Las flechas indican a los protoplastos y vacuolas que contienen al precipitado azul.(5).

3
r
1

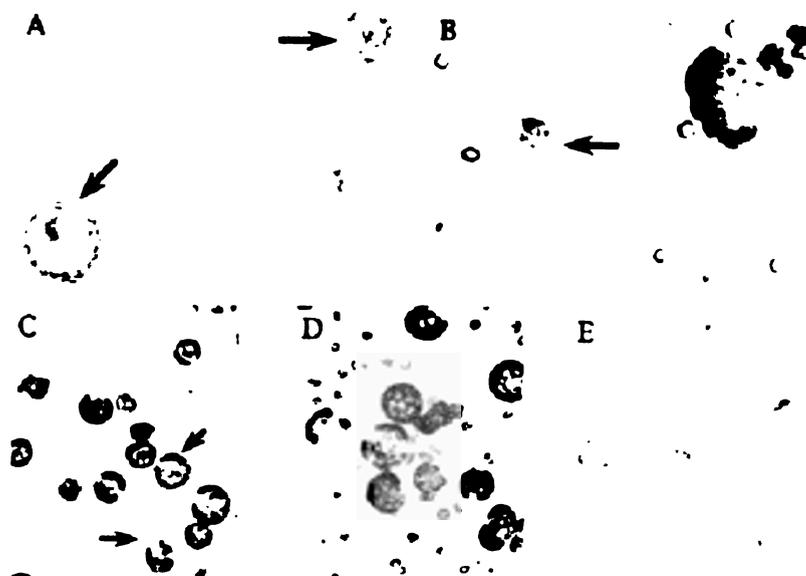


Fig. 18. Formación de un precipitado azul en protoplastos y vacuolas generadas por medio de electroporación.

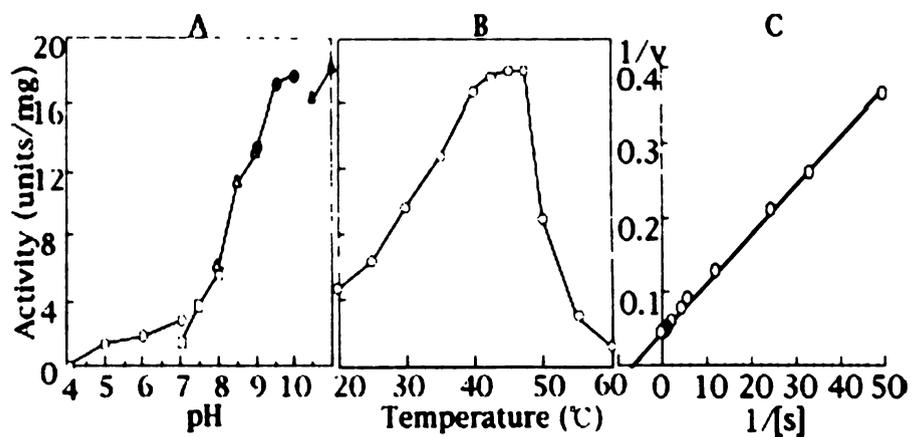


Fig. 19. Efectos de pH, temperatura y la cinética de la reacción en la fermentación de la planta *Polygonum tinctorium*

Por otra parte, en la Fig. 19 se muestra la caracterización del extracto enzimático Indican Synthase. Las partes A y B muestra el efecto de pH y la temperatura en el proceso de fermentación, respectivamente. A mayores niveles de pH (10) y temperatura (45°C), se



acelera el proceso de fermentación, lo que podría reducir el tiempo de esa etapa tal como se muestra en la parte C.

Oxigenación

De acuerdo a las investigaciones realizadas en laboratorio, con una bomba de aire de pequeña capacidad, en las condiciones de 32.4 psi de presión y un tiempo de 50.0 min., se presenta el valor más alto de contenido de indigotina (43.5725%) (2).

Sin embargo, pocos de los productores utiliza el aire comprimido en la etapa de oxigenación y de los métodos utilizados en el mezclado en la actualidad, ninguno garantiza esas condiciones. El método de las paletas en cualquiera de sus formas, además de ser ancestral es empírico. El reciclaje de la mezcla por bomba accionada por motor indica únicamente la presión del caudal de la mezcla que es impulsada y en ningún momento se controla el caudal y la presión de aire. Es más, con este último método, cuándo la mezcla pasa por el rodete impulsor, sufre movimientos vertiginosos a altas presiones que sobrepasan los realizados por alguno de los otros métodos, lo que hace producir cantidades considerables de espuma en tiempos muy reducidos. Algunos productores utilizan éste método.

Sedimentación

En la etapa de sedimentación, se pierde colorante debido a que la forma de la pila y de los barriles que se utilizan no son las adecuadas. Tanto las pilas como los barriles deben ser de tal forma que aceleren el proceso de sedimentación y que permitan, al momento de la extracción del colorante, visualizar la diferencia de los niveles. Permanentemente se deben estar registrando la cantidad de sedimento y el tiempo utilizado para ello e ir buscando la relación más óptima.





Difusión									
	Osmosis Inversa								
Propiedades Eléctricas/Magnéticas									
	Electrofiltración								
Diámetro de μ	0.0001	0.001	0.01	0.1	1.0	10	100	1000	10000
Partícula mms	10^{-7}	10^{-6}	10^{-5}	0.0001	0.001	0.01	0.1	1.0	10
Tamaño mesh standard (BS/Tyler)					10000	2500	400	150	40 20 10 3
Partículas Típicas.....	Moléculas	Virus	Arcilla		Bacteria	Polen	Arena	Mármol	

* Referencia: Broadbent Centrifuges 1995.

En la propuesta del centrifugado (2), la tabla 5 muestra el cedazo y la técnica que se requiere para filtrar el polvo del líquido. Se estima que éste tiene un diámetro de 100 μ mt. y las técnicas recomendadas son la centrífuga cónica y la Batch. En cuanto a los cedazos, están los microfiltro, el filtro medio y el filtro por pantallas. Ninguno de éstos equipos y cedazos se encuentran disponibles en el país. Es más, en caso de utilizarse, habrá que evaluar el material del cedazo, específicamente, y asegurarse que el polvo no quede adherido y que sea fácil su extracción. De lo contrario, se tendría el riesgo de perder cantidades considerables de colorante en el proceso de extracción. Es probable que en el proceso se requiera de pocos minutos.

Secado

Aunque el secado se realiza al ambiente, la rapidez de éste dependerá de las condiciones del clima; es decir, en épocas de invierno se presentan muchos días nublados o días lluviosos y para que el secado sea efectivo, se requiere que la pasta reciba directamente los rayos del sol. El uso de un colector solar, que es un elemento que almacena calor en su interior producto no solo de la conducción de los rayos del sol sino de la radiación de los mismos, es una alternativa viable para esta etapa. En la figura 2' se muestra el secado de la pasta en un colector solar.





Fig. 20. Secado de la pasta en colector solar.

Rendimientos de la producción

Las únicas especies de jiquilite que se producen en el país son la Guatemalense y la Suffruticosa y se considera que ambas tienen las mismas características y comportamientos que la planta *Polygonum tinctorium*. Es decir, el mayor porcentaje de indigotina se encuentra en la hoja de mayor edad y la que se ubica en la parte superior de la planta, según las figuras 16 y 17. Actualmente la indigotina se encuentra en mayores porcentajes en la hoja, no así en los tallos, flores, semillas y otros componentes (Fig. 18). En todo caso, aunque en los procesos no se hagan la separación de la hoja del resto de la planta, se concluye que el colorante obtenido es producto únicamente de la hoja procesada y que los volúmenes de los recipientes (pilas o barriles) están siendo subutilizados por el hecho de incluir tallos. Si en los procesos sólo se utiliza hoja, los recipientes serían óptimamente utilizados y la cantidad de colorante obtenido sería mayor. En la siguiente tabla se presentan los rendimientos promedios de un total de 20 muestras entre las dos especies antes mencionadas, procesando la planta completa en época de invierno.

Tabla 6. Porcentajes del rendimiento del colorante

ESPECIES	LIBRAS DE PLANTA	LIBRAS DE COLORANTE	PORCENTAJES
----------	------------------	---------------------	-------------



			%
Guatemalense	600	1.75	0.3 %
Suffruticosa	600	2.5	0.42 %
Suffruticosa	360 (sólo hoja)	2.8	0.78 %

Aunque resulta muy difícil que en una Planta de Ingeniería se mejore la relación de esos rendimientos, sí se tiene la posibilidad de mejorar los tiempos en cada una de las etapas del proceso y la calidad del colorante.

IV Propuesta de Diseño de una Planta para el Procesamiento del Añil

Definidas las variables para la obtención de buena calidad de colorante y considerando las observaciones a los procedimientos que se utilizan actualmente y a las características físicas de la infraestructura para la obtención de buena cantidad del colorante y que la construcción de la planta para el procesamiento de añil que sea técnica y económicamente factible para los productores, el proceso de extracción del añil debe ser solamente con hoja y tallos menores que la contienen. El diseño debe estar constituido por un tanque para la fermentación o maceración de la hoja, un tanque para la oxigenación y sedimentación del colorante, una rejilla para asegurar que la hoja este inmersa dentro del agua en el tanque de fermentación, una red de tubería para la distribución de aire comprimido que se colocará al tanque de oxigenación, un equipo para la generación de energía eléctrica, en caso de ser necesario; una bomba de agua accionada por motor de combustión o, en su efecto, accionada por motor eléctrico y un compresor para el suministro de aire al tanque y colectores solares para el secado de la pasta del colorante. El tanque de oxigenación deberá ser cónico en el fondo para facilitar la sedimentación.

El productor determinará los requerimientos mínimos para la obtención del colorante en buenas cantidades y calidades, según donde instale la planta; esto es, puede no considerar el equipo para la generación eléctrica que haría funcionar al compresor y la bomba para alimentar el tanque de agua. Esto puede suplirse con las instalaciones de suministro eléctrico y



de agua que toda residencia posee. Adicionalmente se contempla que la planta sea accesible para ser trasladada de lugar.

Considerando

a) 1 manzana de terreno y no más de tres años de producción, las

cantidades promedios de planta son las siguientes:

Primer año : 12,000 lb. (1corte/año)

Segundo año : 25,800 lb. (2cortes/año)

Tercer año : 6,000 lb. (2cortes/año)

Para 5 manzanas, la producción será:

Primer año : 60,000 lb.

Segundo año : 129,000 lb.

Tercer año : 30,000 lb.

Las dimensiones del tanque deben ser para procesar el segundo año como el de mayor producción. Habrá que programar el sembrado de semilla cada año para evitar quedarse sin producto en un momento determinado.

b) La época de producción en invierno se marca entre el 1 de Junio y el 30 de Noviembre, lo que hacen 26 semanas que equivalen a 130 días hábiles.

c) En época de invierno, la planta Sufruticosa esta constituida por el 60% de hoja y 40% de tallo aproximadamente, tal como se expresa en la tabla 7:

Tabla 7. Producción de hoja por manzana.

Producción (mz)	Peso de planta (lb)	Peso de hoja (lb)	Procesamiento de planta (lb/día)	Procesamiento de hoja (lb/día)
1	25,800	15,480	198	119
2	51,600	30,960	396	238
3	77,400	46,440	594	357



4	103,200	61,920	792	476
5	129,000	77,400	990	595

- d) El volumen de la hoja en litros se expresa con la siguiente relación: $\rho = 1.76 \text{ lb. / lt.}$
- e) Los volúmenes promedios totales, utilizando la relación de 1 lb. de hoja por 1 galón de agua (1 galón = 3.785 lt.) que se procesarán, se muestran en la tabla 8.

Tabla 8. Volúmenes de producción por manzana

Producción diaria de hoja (lb)	Volumen de hoja (lt)	Volumen de agua (lt)	Volumen total en litros (lt)	Volumen total en (Mt ³)
119	67.6	450.4	518	0.518
238	135.2	900.8	1036	1.036
357	202.8	1351.2	1554	1.554
476	270.4	1801.6	2072	2.072
595	330	2252	2590	2.590

- f) Se aplica un factor de seguridad (sobredimensión) de 1.3 al volumen total.
- g) Las pérdidas de volumen de agua después de evacuar el desecho sólido de la planta al finalizar la etapa de fermentación y comenzar la etapa de oxigenación, es del 5 % aproximadamente la cual es absorbida en el desecho sólido.. Cuando se procesa la planta (tallo y hoja), el porcentaje alcanza el 30% aproximadamente.
- h) Finalizada la etapa de sedimentación, un 18 % del volumen se extrae para iniciar la etapa de filtrado. Con éste volumen se definirá la altura del cono, puesto que es ahí donde se espera se deposite el sedimento. Los datos se resumen en la siguiente tabla 9.

Tabla 9. Volúmenes de trabajo en el proceso.

Producción de hoja diario (lb)	Volumen útil (mt ³)	Volumen del tanque sobredimensionado (mt ³)	Volumen de líquido a oxigenar (mt ³)	Volumen de sedimento a filtrar (mt ³)
119	0.518	0.673	0.428	0.077
238	1.036	1.347	0.856	0.163
357	1.554	2.020	1.284	0.231
476	2.072	2.694	1.711	0.108
595	2.590	3.367	2.138	0.185

Dimensiones de los tanques



Determinando la producción y los volúmenes que se requieren, las dimensiones de los tanques son las siguientes.

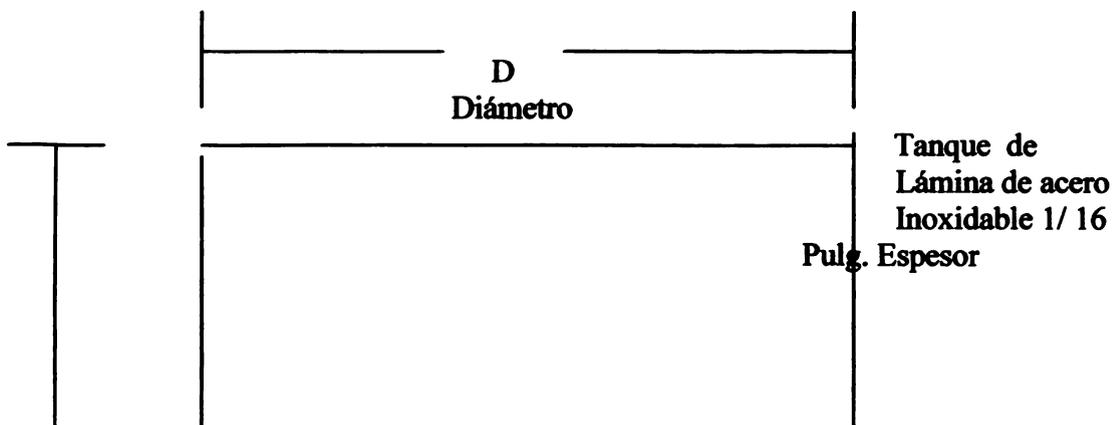
TANQUE DE FERMENTACIÓN

Tabla 10a. Dimensiones del tanque. Primera alternativa

Área a procesar (mz)	Hojas diarias (lb)	Volumen (m ³)	Altura H (mt.)	Diámetro D (mt)	Diámetro A de válvula (pulg.)
1	Para 1 manzana de producción sólo hoja				
	119	0.673	1.30	0.80	3
2	Para 2 manzanas de producción sólo hoja				
	238	1.347	1.30	1.14	3
3	Para 3 manzanas de producción sólo hoja				
	357	2.020	1.30	1.40	3
4	Para 4 manzanas de producción sólo hoja				
	476	2.694	1.30	1.62	3
5	Para 5 manzanas de producción sólo hoja				
	595	3.367	1.30	1.80	4

Tabla 10b. Dimensiones del tanque. Segunda alternativa

Area a Procesar (mz)	Hojas diarias (lb)	Volumen (m ³)	Altura H (mt.)	Diámetro D (mt)	Diámetro A de válvula (pulg.)
1	Para 1 manzana de producción sólo hoja				
	119	0.673	0.857	1.00	3
2	Para 2 manzanas de producción sólo hoja				
	238	1.347	1.715	1.00	3
3	Para 3 manzanas de producción sólo hoja				
	357	2.020	2.571	1.00	3
4	Para 4 manzanas de producción sólo hoja				
	476	2.694	3.430	1.00	3
5	Para 5 manzanas de producción sólo hoja				
	595	3.367	4.287	1.00	4





H
Altura



A
(Válvula de drenaje)

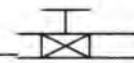


Fig. 23. Tanque de fermentación

TANQUE DE OXIGENACIÓN Y SEDIMENTACIÓN

Tabla 11a. Dimensiones de los tanques. Primera alternativa

H (mt)	D(mt)	h(mt)	C(pul)	A(pul)	E(pul)	F(pul)	B(pul)	I(pul)	G(pul)	L(cm)
Para 1 manzana de producción sólo hoja con ramas laterales										
0.71	1.00	0.38	3	1/4	1/4	1/4	3	1/4	3	30
Para 2 manzanas de producción sólo hoja										
0.92	1.20	0.53	3	1/2	1/2	1/2	3	1/2	3	30
Para 3 manzanas de producción sólo hoja										
1.49	1.20	0.80	3	1/2	1/2	1/2	3	1/2	3	30
Para 4 manzanas de producción sólo hoja										
1.98	1.20	1.00	4	1/2	1/2	1/2	4	1/2	4	30
Para 5 manzanas de producción sólo hoja										
1.81	1.40	0.98	4	1/2	1/2	1/2	4	1/2	4	30

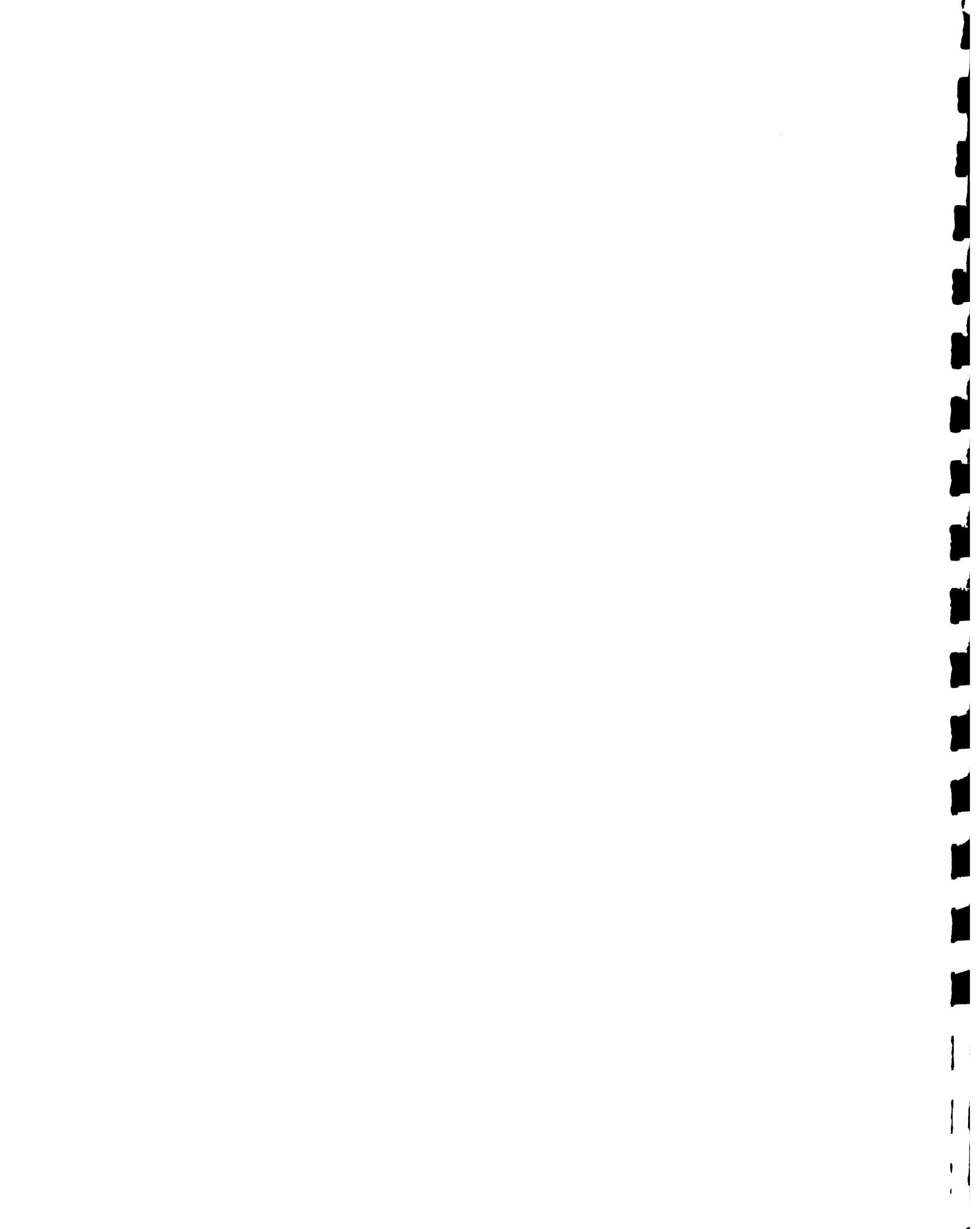


Tabla 11b. Dimensione de los tanques. Segunda alternativa.

H (mt)	D(mt)	h(mt)	C(pul)	A(pnl)	E(pul)	F(pul)	B(pul)	I(pul)	G(pul)	L(cm)
Para 1 manzana de producción sólo hoja										
1.10	0.80	0.60	3	1/4	1/4	1/4	3	1/4	3	30
Para 2 manzanas de producción sólo hoja										
1.10	1.14	0.60	3	1/2	1/2	1/2	3	1/2	3	30
Para 3 manzanas de producción sólo hoja										
1.10	1.40	0.60	3	1/2	1/2	1/2	3	1/2	3	30
Para 4 manzanas de producción sólo hoja										
1.10	1.62	0.60	4	1/2	1/2	1/2	4	1/2	4	30
Para 5 manzanas de producción sólo hoja										
1.10	1.80	0.60	4	1/2	1/2	1/2	4	1/2	4	30

Donde:

H: Altura

D: Diámetro

A: Válvula de paso

B: Válvula de paso

D: Tubería PVC

E: Codo

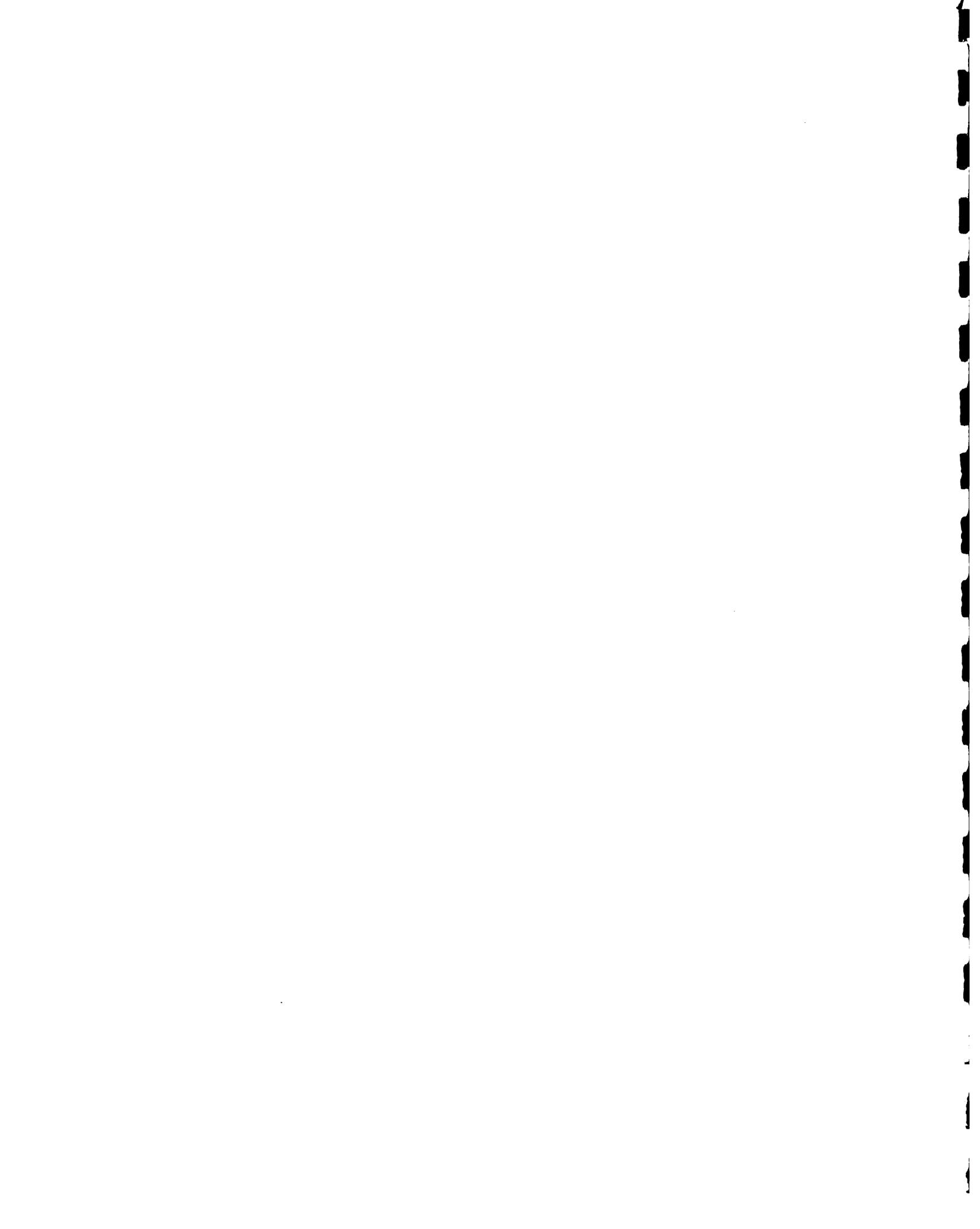
F: Tubería PVC

G: Codo

L: Altura de piso

h: Altura de codo

I: Tubo de vidrio



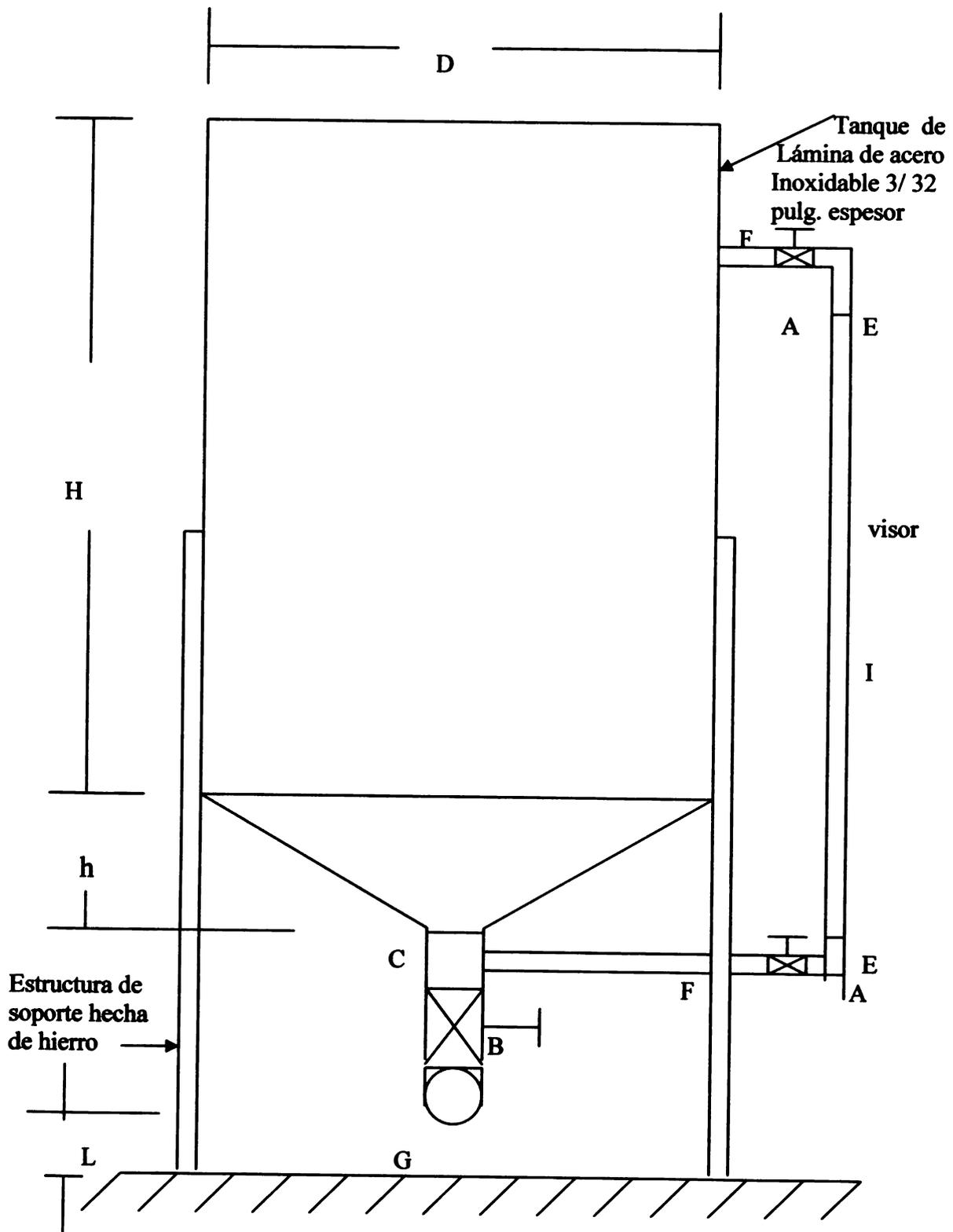


Fig. 24. Tanque de oxigenación y sedimentación



La oxigenación se hará con compresor accionado por motor eléctrico o de combustión. Se deberá disponer de una tubería flexible para conectar el compresor a la tubería de oxigenación en el tanque, y de un regulador para establecer la presión de trabajo que la define la altura del líquido en el tanque. La instalación se hará con difusores plásticos de 4 pulg. de diámetro, tipo ducha con 30 agujeros cada una, que se acoplarán en el interior del tanque con tuberías y accesorios PVC de ½ pulg. que estarán instaladas en el exterior y protegidas por una válvula para evitar que se pierda el sedimento que se acumularía en ella (ver Fig.26).

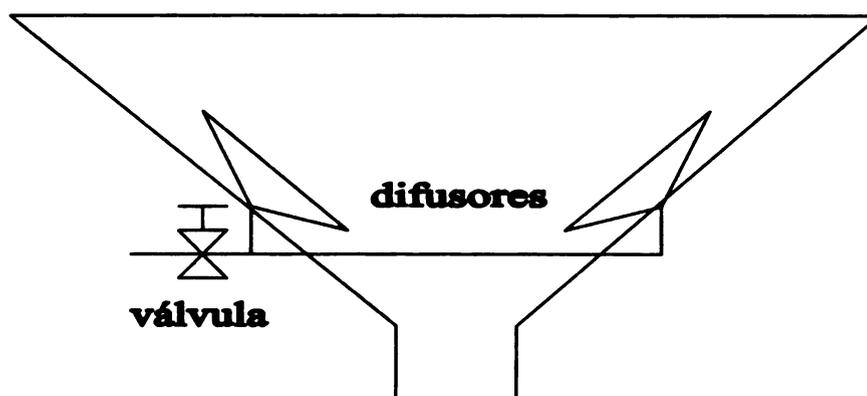


Fig. 26. Forma de distribución de los dispersores en el interior del tanque.

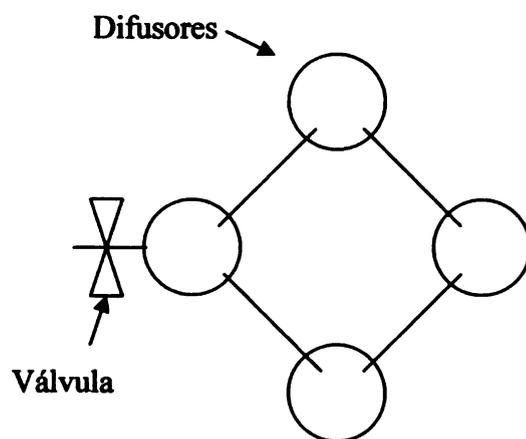


Fig. 27. Tuberías PVC 1/2 pulg. diámetro conectadas a difusores para la distribución de aire comprimido.



Las figuras 26 y 27 muestran las vistas de la planta en las cuales se oxigena el líquido tal como se propone.

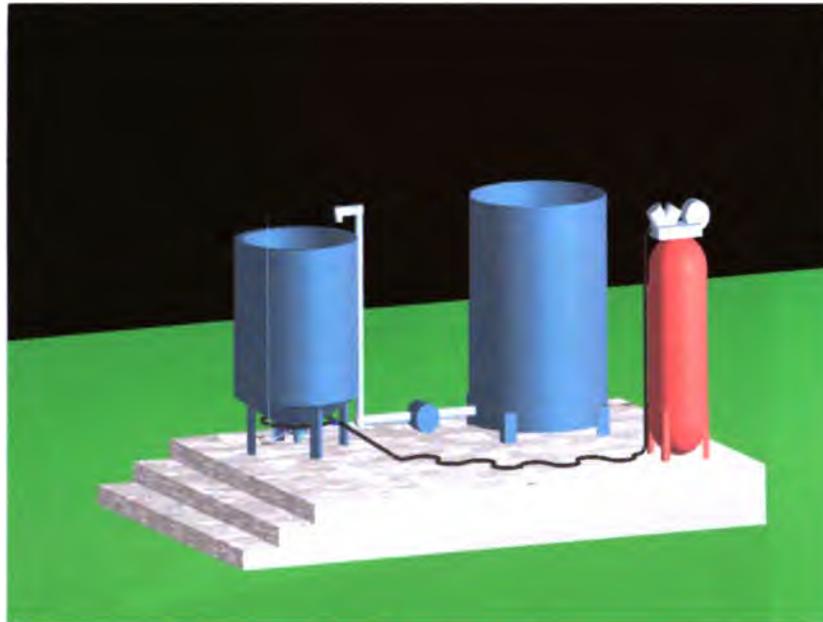


Fig. 26. Vista de la planta de ingeniería cuya transferencia de líquido es por bomba de agua.

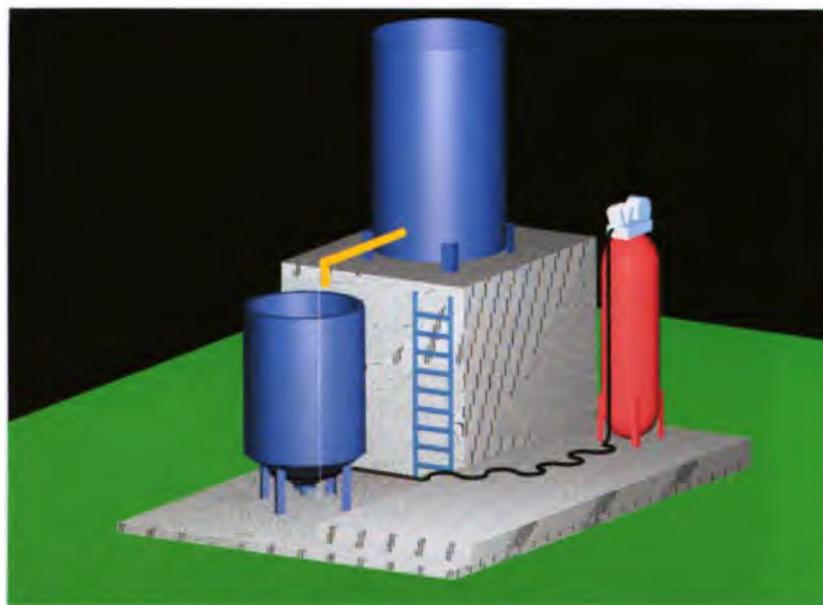


Fig. 27. Vista de la planta de ingeniería cuya transferencia



de líquido es por gravedad

No obstante, se puede oxigenar el líquido por tuberías que se colocan en el interior del tanque, tal como se muestran en las figuras 28 y 29. En este caso, se deberán soldar unos ganchos al interior del tanque para evitar que suba la tubería que distribuye el oxígeno.

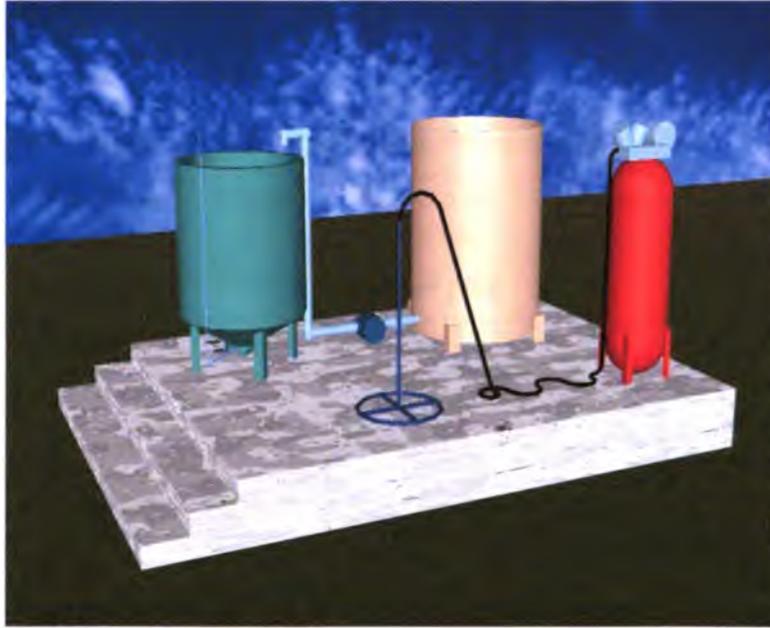
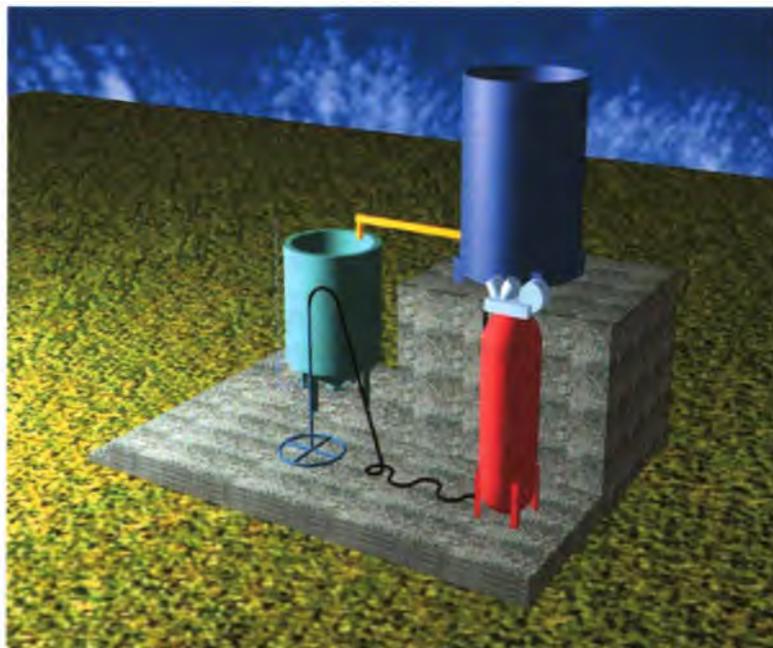
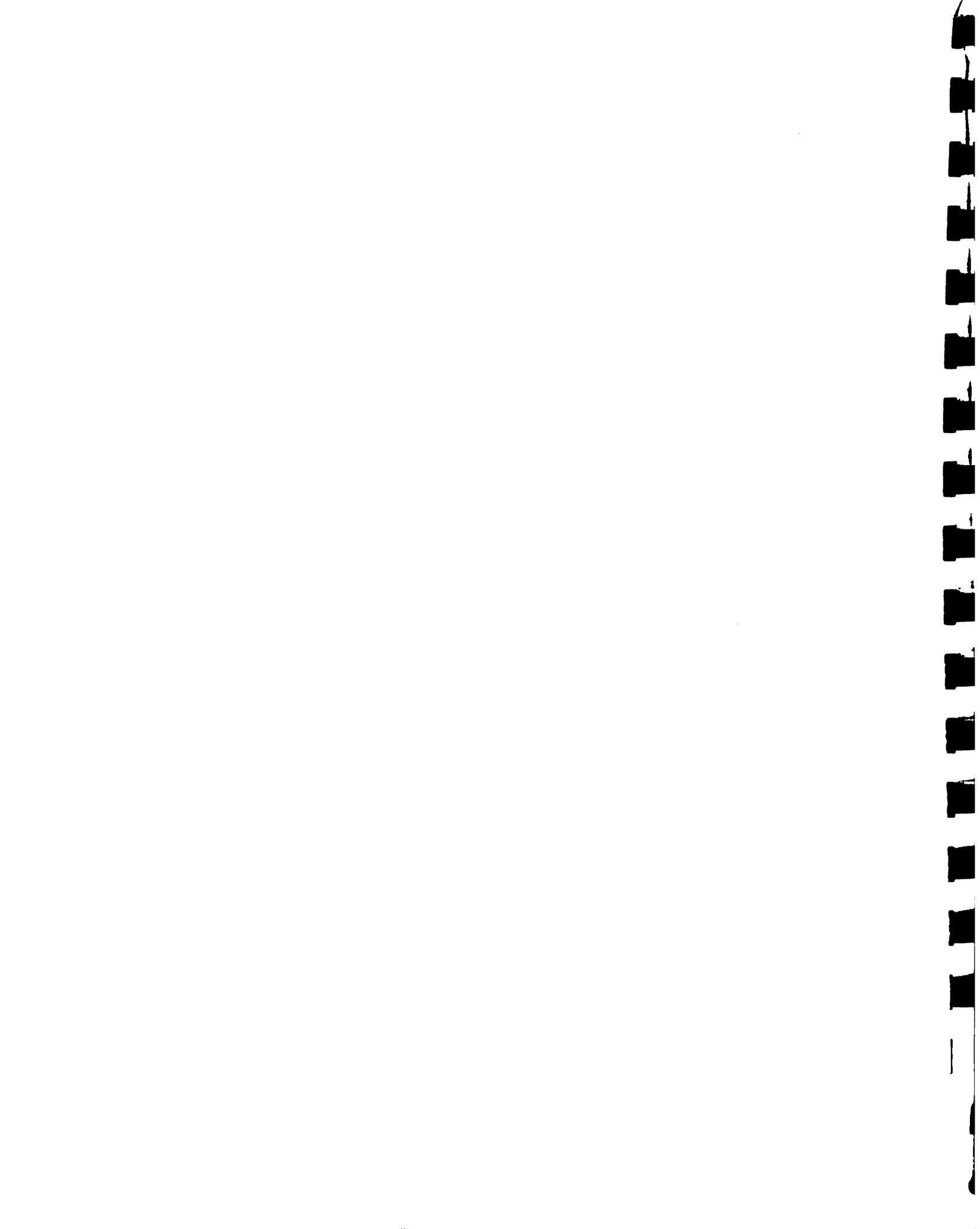


Fig. 28. Vista de la planta de ingeniería cuya transferencia de líquido es por bomba de agua.





**Fig. 29. Vista de la planta de ingeniería cuya transferencia
de líquido es por gravedad**

La siguiente tabla muestra las presiones según la altura del líquido, el número de probables agujeros 1/64 pulg. en la tubería, el caudal de aire que demanda, la presión y la potencia del compresor que se requerirá para la oxigenación.

Tabla 12a. Requerimientos de aire comprimido. Primera alternativa

Producción de hoja diario	Diámetro del tanque	Altura del líquido	Número de agujeros de 1/64 pulg	Presión del aire	Caudal de aire cfm	Potencia de compresor
119 lb.	1.00 m	0.55 m	120	20	14.28	5 Hp
238 lb.	1.20 m	0.76 m	120	30	18.72	5 Hp
357 lb.	1.20 m	1.14 m	150	30	23.40	7.5 Hp
476 lb.	1.20 m	1.51 m	180	40	34.20	10 Hp
595 lb.	1.40 m	1.39 m	240	50	54.00	15 Hp

Tabla 12b. Requerimientos de aire comprimido. Segunda alternativa

Producción de hoja diario	Diámetro del tanque	Altura del líquido	Número de agujeros de 1/32 pulg	Presión del aire	Caudal de aire cfm	Potencia de compresor
119 lb.	0.80 m	0.84 m	120	20	14.28	5 Hp
238 lb.	1.14 m	0.84 m	120	30	18.72	5 Hp
357 lb.	1.40 m	0.84 m	150	30	23.40	7.5 Hp
476 lb.	1.62 m	0.84 m	180	40	34.20	10 Hp
595 lb.	1.80 m	0.84 m	240	50	54.00	15 Hp

cfm : pies cúbicos por minuto



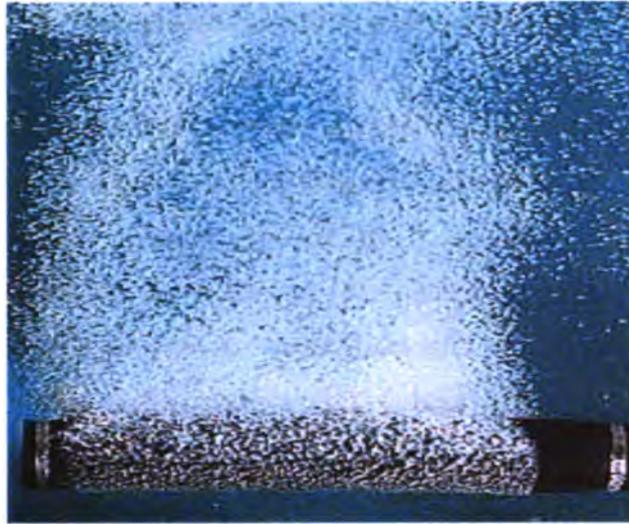


Fig. 25. Ejemplo de aireación a presión en el líquido.

Para el secado del colorante, deberán fabricarse colectores solares del tamaño del recipiente donde se recolecta la mezcla sedimentada. Bien pueden utilizarse como recipientes bandejas hechas de lámina galvanizada. Su tamaño es de 1.00 m de largo, 0.5 m de ancho y 0.20 m de alto, para almacenar un volumen de 0.75 m^3 ($1.0 \times 0.5 \times 0.15 \text{ m}^3$) por bandeja.

Los colectores son hechos de madera de conacaste por que permanecerá a la interperie y en la parte superior un vidrio de 5 mm. de espesor. En su interior se recomienda forrarlos con papel aluminio para mejorar su eficiencia. En los colectores pueden ubicarse 2 bandejas, lo que equivale al volumen de la pasta sedimentada de una producción de 5 manzanas.



V Funcionamiento del proceso utilizando la planta piloto.

- 1- Deberá desprenderse manualmente la hoja de la planta utilizando guantes de cuero. De esa forma se asegura que el desprendimiento es mucho más práctico y rápido.
- 2- El desprendimiento manual requiere de 3 personas utilizando el mismo tiempo que el de corte de la planta; en el cuál, normalmente, se requieren de 3 personas. La hoja se coloca ordenadamente dentro del tanque de fermentación y luego se coloca la rejilla para evitar que la hoja salga a la superficie.
- 3- Colocada la rejilla dentro del tanque, se suministra agua con cantidades ya detalladas. Para ello se requiere un tiempo máximo de 60 min. y para el remojo se ocupara de 14 horas.
- 4- Después de las 14 horas, se retira la rejilla de hojas manualmente y luego se traslada el líquido al tanque de oxigenación por gravedad o con una bomba.
- 5- Se introduce la tubería de distribución del oxígeno al segundo tanque y se alimenta de aire comprimido al tanque por un tiempo de 30 minutos a la presión recomendada según los volúmenes de hoja y agua utilizados (ver tabla 12) y se deja reposar 10 minutos para reiniciar la alimentación de aire comprimido por 30 minutos o hasta que la espuma producida hubiese desaparecido totalmente. Se sugiere que, al reiniciar la oxigenación, se haga un mezclado manual con paleta para acelerar el desvanecimiento de la espuma.
- 6- Realizada la oxigenación, se deja sedimentar la mezcla por 24 horas aproximadamente. La separación del volumen sedimentado con la del agua se podrá ver con el visor.
- 7- Se drena el sedimento abriendo la válvula con mucho cuidado para evitar generar turbulencias al interior del recipiente y colocar el sedimento en cubetas. Se debe tener el cuidado, además, de diferenciar el color de lo que se drena, el color del sedimento es azul profundo y el del agua color café claro.
- 8- Se realiza un filtrado por 4 horas para eliminar volúmenes de agua y el residuo se coloca en bandejas
- 9- Luego las bandejas se trasladan y se colocan directamente en los colectores solares; debe asegurarse que la cara principal del colector este frente al sol. El tiempo



requerido para el secado es de 20 horas hábiles. En esta etapa se asegura que no se pierde la calidad del colorante.

Partiendo del corte de la biomasa, a continuación se presenta de manera resumida el proceso de producción. Se incluye la casilla de período para mostrar que algunas actividades se hacen al mismo tiempo.

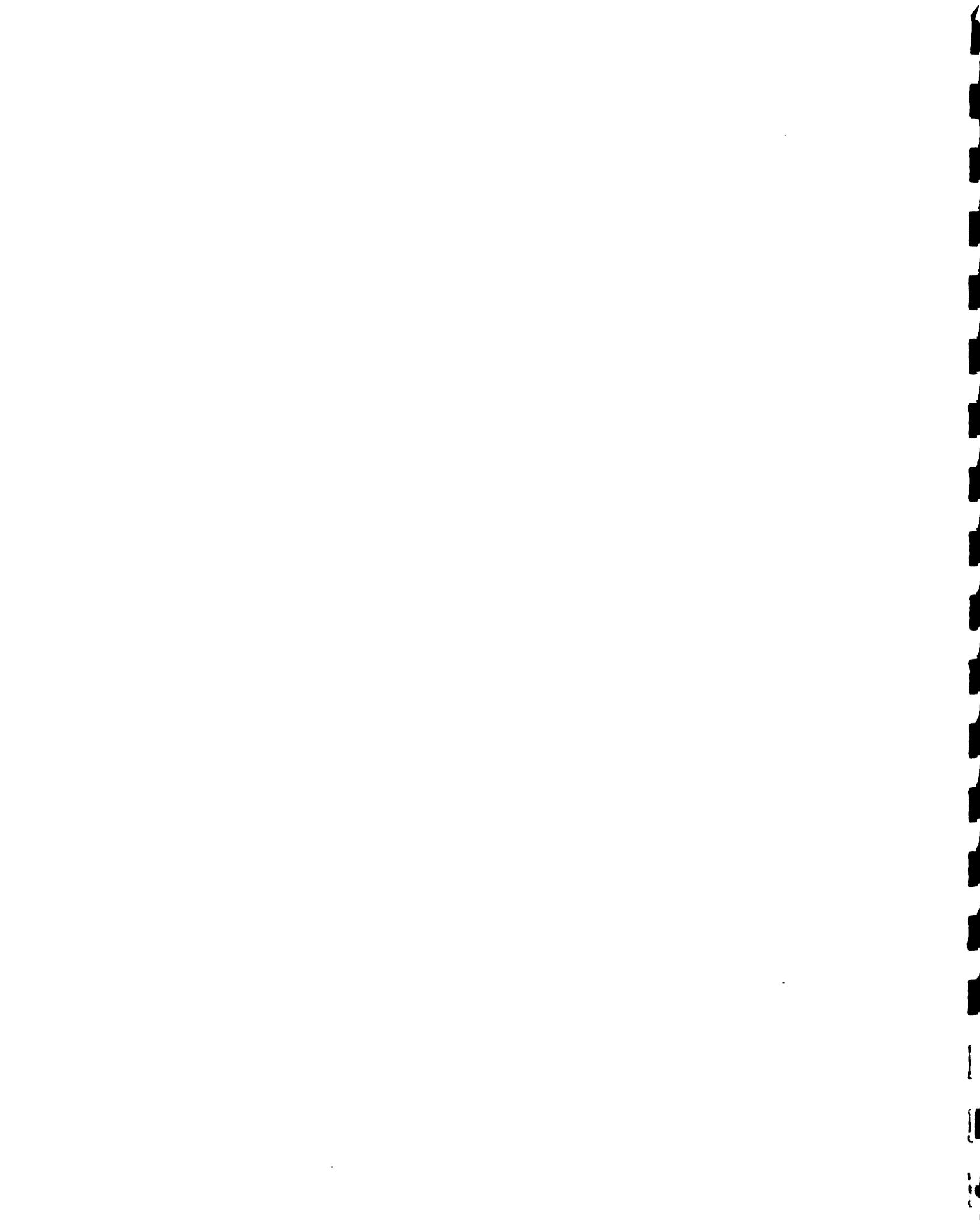
Tabla 13a. Tiempos, movimientos y recursos en el proceso. Primer día

No.	Actividad	Período	Tiempo requerido	Recursos
1	Pesado de planta	10:00 a 10:30 horas	½ hora	3 personas
1	Separar ramas laterales a tallo primario y secundario	10:30 a 14:00 horas	3 ½ horas	3 personas
2	Colocar hojas en tanque de fermentación	14:00 a 15:00 horas	1 Hora	3 personas
3	Llenado de agua a tanque de fermentación	15:00 a 16:00 horas	1 hora	1 persona
4	Pesado de tallo	15:00 a 16:00 horas	1 hora	2 personas
5	Preparación de tendales	16:00 a 16:30 horas	½ hora	3 personas

Tabla 13b. Tiempos, movimientos y recursos en el proceso Segundo día

No.	Actividad	Período	Tiempo requerido	Recursos
1	Traslado de líquido a tanque de oxigenación	07:00 a 07:45 horas	¾ horas	1 personas
2	Acoplar compresor a tubería para oxigenación	07:00 a 07:45 horas	¾ horas	1 personas
3	Oxigenación	07:45 a 09:15 horas	1 ½ horas	1 persona
4	Sedimentación	09:15 por 23 horas	23 horas	

Tabla 13c. Tiempos, movimientos y recursos en el proceso Tercer día



No.	Actividad	Período	Tiempo requerido	Recursos
1	Drenaje de agua	07:00 a 08:15 horas	1 1/4 horas	2 personas
2	Extraer sedimento	08:15 a 10:00 horas	1 3/4 Horas	2 personas
3	Filtrado	10:00 a 14:00 horas	4 horas	2 persona
4	Traslado de pasta a colector solar	14:00 a 14:30 horas	½ hora	2 personas
5	Inicio de secado	14:30 horas	20 horas	

De igual forma, se recomienda que todo el proceso de producción se registre según el formato siguiente. En él se incluye la etapa de corte de la planta y algunos otros controles de las propiedades físicas y químicas del producto en las diferentes etapas. Lo importante del formato es que, para cada producción, se tiene la información para determinar las cantidades, calidades, rendimientos y utilidades.



HOJA DE RECOLECCION DE DATOS PRODUCCIÓN DE AÑIL
LUGAR _____

Variedad _____ No. de lote _____ No. de cosecha _____ Edad de la planta _____
Proceso: Pilas () Tanques () Fecha inicio _____ Fecha final _____

No.	Concepto	Unidad	Mano de obra	Observaciones
CORTE DE HOJA				
1	Tiempo de corte	Hrs.		
2	Tiempo de traslado	Hrs.		
3	Tiempo de pesado	Hrs.		
4	Peso de hoja	Lb.		
PREPARACIÓN DE CARGA				
1	Tiempo de colocación de hoja	Hrs.		
2	Preparación de equipo de bombeo	Hrs.		
3	Tiempo de llenado de agua	Hrs.		
4	Volumen de agua	Gal.		
FERMENTACION				
1	Tiempo de fermentación	Hrs.		
2	PH inicial			
3	PH final			
4	Temperatura inicial	°C		
5	Temperatura final	°C		
6	Temperatura ambiente	°C		
OXIDACION				
1	Volumen	Gal.		
2	Tiempo de oxidación	Hrs.		
3	Temperatura inicial	°C		
4	Temperatura final	°C		
5	PH inicial			
6	PH final			
7	Tiempo de llenado pila de oxigenación	Hrs.		
SEDIMENTACIÓN				
1	Volumen total	Gal.		
2	Volumen sedimentado	Gal.		
3	Tiempo de sedimentación	Hrs.		
4	PH final			
5	Tiempo de drenaje	Hrs.		
6	Tiempo de recolección de sedimento	Hrs.		
SECADO				
1	Tiempo de colocación en bandejas	Hrs.		
2	Tiempo de secado	Hrs.		
3	Color inicial			
4	Color final			

HOJA RESUMEN

Corte	Porcentaje hoja-tallo	%	
Carga	Relación biomasa- agua	Lb/gal	
Fermentación	Adición de glucosa	gr	
	Adición de otro elemento		
	Hora inicio y final	Hrs.	
Oxidación	Tipo de oxigenación		
	Adición de químico		
	Hora de inicio y final	Hrs.	
Sedimentación	Hora de inicio y final	Hrs.	
	Volumen sedimentado	Gal.	
Secado	Hora inicial y final	Hrs.	
	Cantidad de añil obtenido	Lbs.	
	% de indigotina	%	



VI Costos de Inversión

Los costos de la inversión inicial se detallan en los siguientes cuadros. Es de aclarar que las cantidades señaladas podrán variar dependiendo del lugar de fabricación y cantidades a producir.

Tabla 15. Costo de los tanques.

	Producción	1	2	3	4	5
	Tanques	manzana	manzanas	manzanas	manzanas	manzanas
Fermentación						
Oxigenación						
Sub total						

Tabla 16. Costo de los accesorios.

	Producción	1	2	3	4	5
	Accesorios	manzana	manzanas	manzanas	manzanas	manzanas
Sub total						
Totales						

VII Observaciones

Aunque se han hecho algunas pruebas con aire comprimido, la información aquí presentada corresponde a valores promedio de esas pruebas. Como es un nuevo sistema de producción, será importante registrar la información de todas las condiciones de operación para luego ajustar el proceso y tener, al más corto tiempo, las condiciones de operación precisas que generen la mayor cantidad de colorante con la más alta calidad.

ETAPA DE FERMENTACIÓN

En el documento se ha identificado a esta etapa por maceración o fermentación. Ante todo, definiremos ambos conceptos para estandarizar el nombre de la etapa



Maceración: Ablandar una cosa estrujándola o manteniéndola sumergida en un líquido. Modificar el cuerpo.

Fermentación: Degradación anaeróbica y/o aeróbica de los compuestos orgánicos realizadas por las enzimas de ciertos microorganismos, llamados fermentos. La acción de fermentar es producir un proceso químico por la acción de un fermento.

Debido a que no se tiene evidencia de la existencia de microorganismos en el proceso, no se le puede llamar fermentación. Únicamente se le llamará **extracción del indican**.

Para mejorar el rendimiento, es recomendable que en el proceso sólo se incluya hoja. Sin embargo, considerando que el tiempo requerido es mayor y el costo de la mano de obra se eleva sustancialmente, pueden incluirse hojas con ramitas. No obstante, debido que es nueva forma de trabajo, será importante encontrar el balance entre el costo de la mano de obra y la cantidad de producto obtenido. Este último dependerá de la cantidad de hoja.

La adición de un agente de fermentación, es uno de los factores que se considera significativo en la producción de indigotina. Los dos principales constituyentes químicos de la caña de azúcar son la sacarosa en el jugo y la celulosa en la fibra; cada uno de ellos esta compuesto de azúcares simples (glucosa y fructosa). Los porcentajes de indigotina obtenidos adicionando glucosa como agente de fermentación, presentan menor variabilidad y son mayores en relación a los obtenidos con la fructosa. El factor glucosa presentan una tendencia a aumentar el porcentaje de indigotina al máximo, cuando sus niveles tienden al 5% con respecto al tamaño de muestra (cantidad de hoja) (2). Ensayos agregando glucosa no se han hecho por lo que queda abierta la posibilidad de la investigación de ese comportamiento.

Por otra parte, en la figura 19, las partes A y B muestra el efecto de pH y la temperatura en el proceso de fermentación, respectivamente. A mayores niveles de pH (10) y temperatura (45° C) se acelera el proceso de fermentación, lo que podría reducir el tiempo de esa etapa; ensayos con esas condiciones no se han realizado.



ETAPA DE OXIGENACION

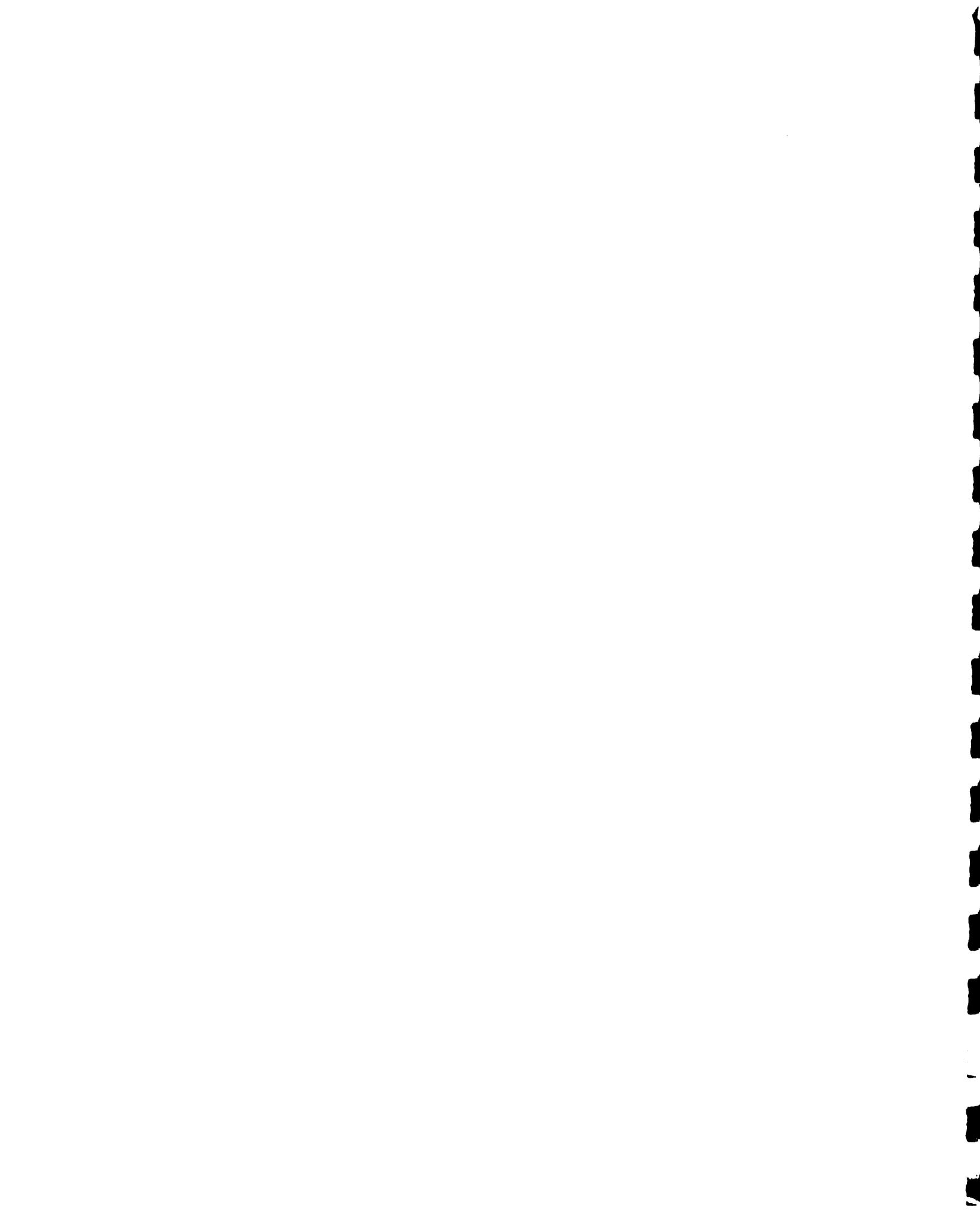
Oxigenación es el proceso mediante el cual el líquido de trabajo se pone en contacto íntimo con el aire, con el propósito de modificar las concentraciones de las sustancias contenidas en él. La concentración del aire es directamente proporcional al área de contacto, a la saturación del líquido y al coeficiente de transferencia entre ambos elementos e inversamente proporcional al volumen del líquido. No obstante, la absorción de aire en el líquido aumenta con el tiempo o período de oxigenación hasta solidificar la partícula (6).

La oxigenación con aire comprimido en la producción del colorante de añil es mucho más eficiente que con cualquier otro método utilizado hasta la fecha, por el hecho que se puede lograr una concentración de aire mayor; sin embargo, los costos iniciales de inversión son bastante elevados debido a que se requiere que el equipo mantenga alimentando permanentemente de aire con las presiones adecuadas para generar turbulencia en el líquido. El tamaño de la cámara de compresión está íntimamente relacionado con la capacidad del motor eléctrico y es la que debe satisfacer la demanda de aire en el tanque. Existen otras opciones que se consideran menos eficientes y las variables son difíciles de controlar para optimizar el proceso, todas ellas mecanizadas: la recirculación a través de una bomba, mezclador accionado por motor eléctrico o accionamiento de paletas por motor eléctrico.

Es de señalar que es la etapa más importante del proceso. La eficiencia consiste en extraer la mayor cantidad de indigotina producto de oxidar el indóxido que se forme en la primera etapa. Determinar y controlar las variables implícitas en la oxigenación es el objetivo del productor para optimizar el rendimiento.

SEDIMENTACION

La sedimentación consiste en la separación de los sólidos suspendidos en el líquido por asentamiento gravitacional. La velocidad de asentamiento de las partículas está determinada por su tamaño, forma y densidad, así como la naturaleza del líquido a través del cual se asientan (7).



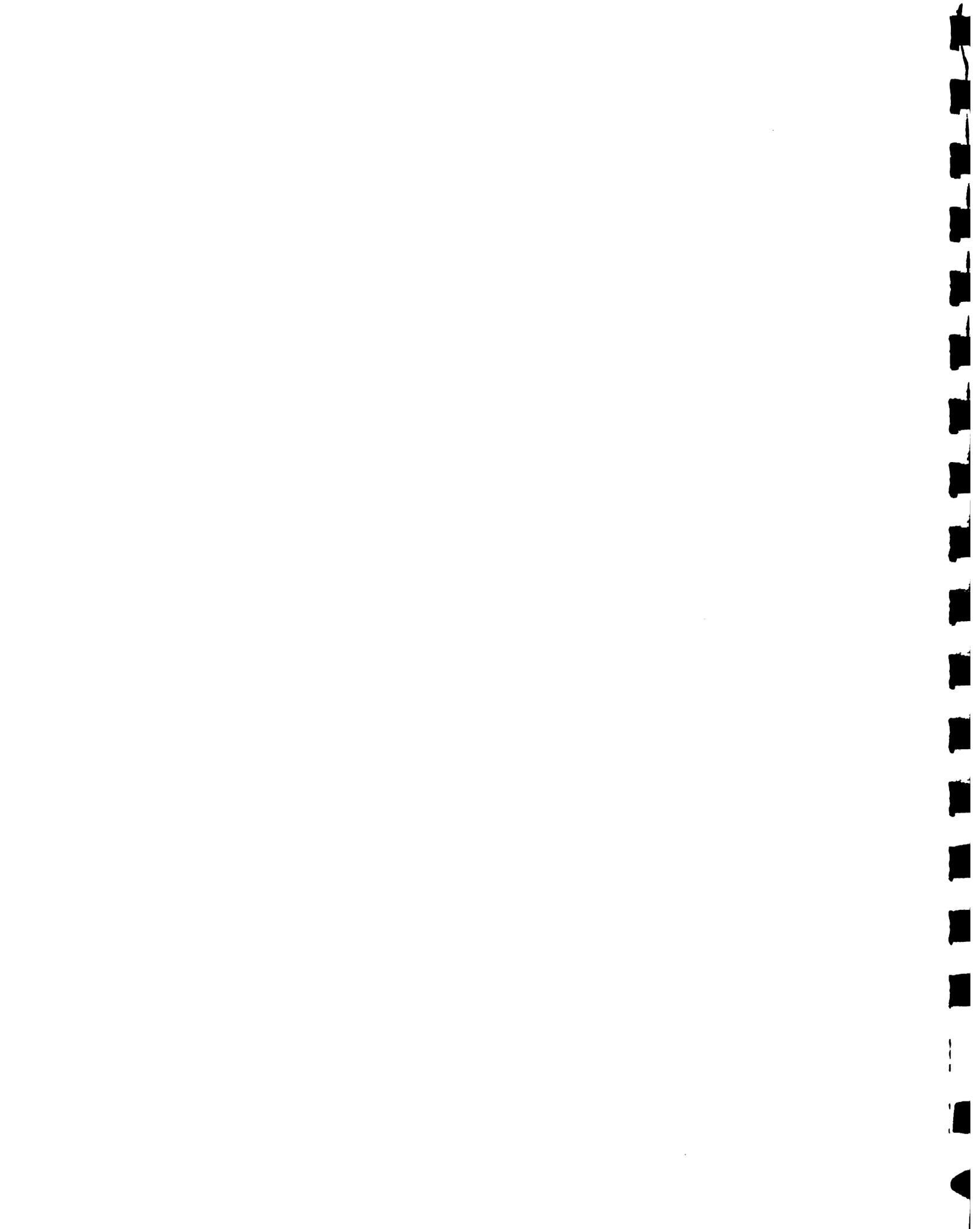
Cuando las partículas se asientan a través del líquido en caída libre, el líquido desplazado por las partículas se mueve hacia arriba y el espacio entre las partículas es tan grande que el contra flujo no interpone fricción. Cuando las partículas se aproximan al fondo del recipiente y empiezan a formar una interfase líquido/sólido, disminuyendo su velocidad de caída libre. Los sólidos reunidos se compactan lentamente en un proceso que se llama asentamiento. En éste, las partículas se encuentran tan juntas que la fricción producida por la velocidad del líquido desplazado interfiere con el movimiento de la partícula.

En términos generales, los procesos de sedimentación se clasifican según la tabla 2.

Tabla 17. Modelos de procesos de sedimentación (8).

Tipo de sedimentación	Características de los sólidos en suspensión	Descripción del proceso
1	Partículas discretas y aisladas en soluciones diluidas	No existe interacción entre las partículas y entre las partículas y el resto del fluido
2	Partículas aglomerables en soluciones relativamente diluidas	Las partículas se aglomeran y agrupan en partículas de mayor tamaño
3	Soluciones de concentración intermedia	Las partículas interfieren entre sí en su descenso, manteniendo posiciones estables
4	Soluciones de alta concentración	Se forma una estructura entre las partículas que va modificándose lentamente con el tiempo

Según los resultados obtenidos en los ensayos realizados, la sedimentación que tienen las partículas de afil se pueden clasificar en un intermedio entre el tipo 2 y el tipo 3 (ver tabla 17). Aunque la granulometría (tamaño de las partículas) del afil en la solución no se ha determinado, sí se ha observado que no son uniformes.



Por otra parte, en los procesos de sedimentación se presentan interferencias que no son considerados en los modelos teóricos y que deben tomarse muy en cuenta. La tabla 3 muestra esos detalles.

Tabla 3. Interferencia de la sedimentación (8).

Tipo de interferencia	Causa	Efecto
Corrientes de densidad	-Corrientes térmicas	-Cortocircuitos superficiales -Cortocircuitos de fondo
	-Corrientes de concentración	-Giros de la masa de agua
Corrientes eólicas	-Vientos que impulsan la masa superficial	-Desvíos del flujo superficial
Corrientes cinéticas	-Alteraciones hidráulicas en la entrada	-Flujos transversales en el tanque
	-Obstrucciones en la zona de decantación	-Turbulencias que levantan las partículas asentadas
	-Alteraciones de salida	-Succión de las partículas

Considerando el tipo de sedimentación y la interferencia que se presenta, se justifica el diseño de un tanque con fondo inclinado; sin embargo, la profundidad debe ser baja para evitar, en el momento de la extracción, flujos transversales, turbulencias que levanten las partículas y succión de las mismas que produzcan giros o turbulencias internas. Esto implica que la altura del cono debe reducirse al menos a la mitad, sin importar que parte del sedimento rebase el cono. Desde luego, la apertura de la válvula para la extracción del sedimento debe ser al mínimo para evitar lo antes expuesto.

La temperatura es un factor que influye en el asentamiento de las partículas (6). Se estima que al aumentar la temperatura del líquido de trabajo, que en nuestro caso es el agua, la densidad y la viscosidad disminuye y la velocidad de sedimentación aumenta, condiciones de trabajo que será necesario ensayar para verificarlo.

La tabla 11 se modifica , entonces, con la nueva medida del cono

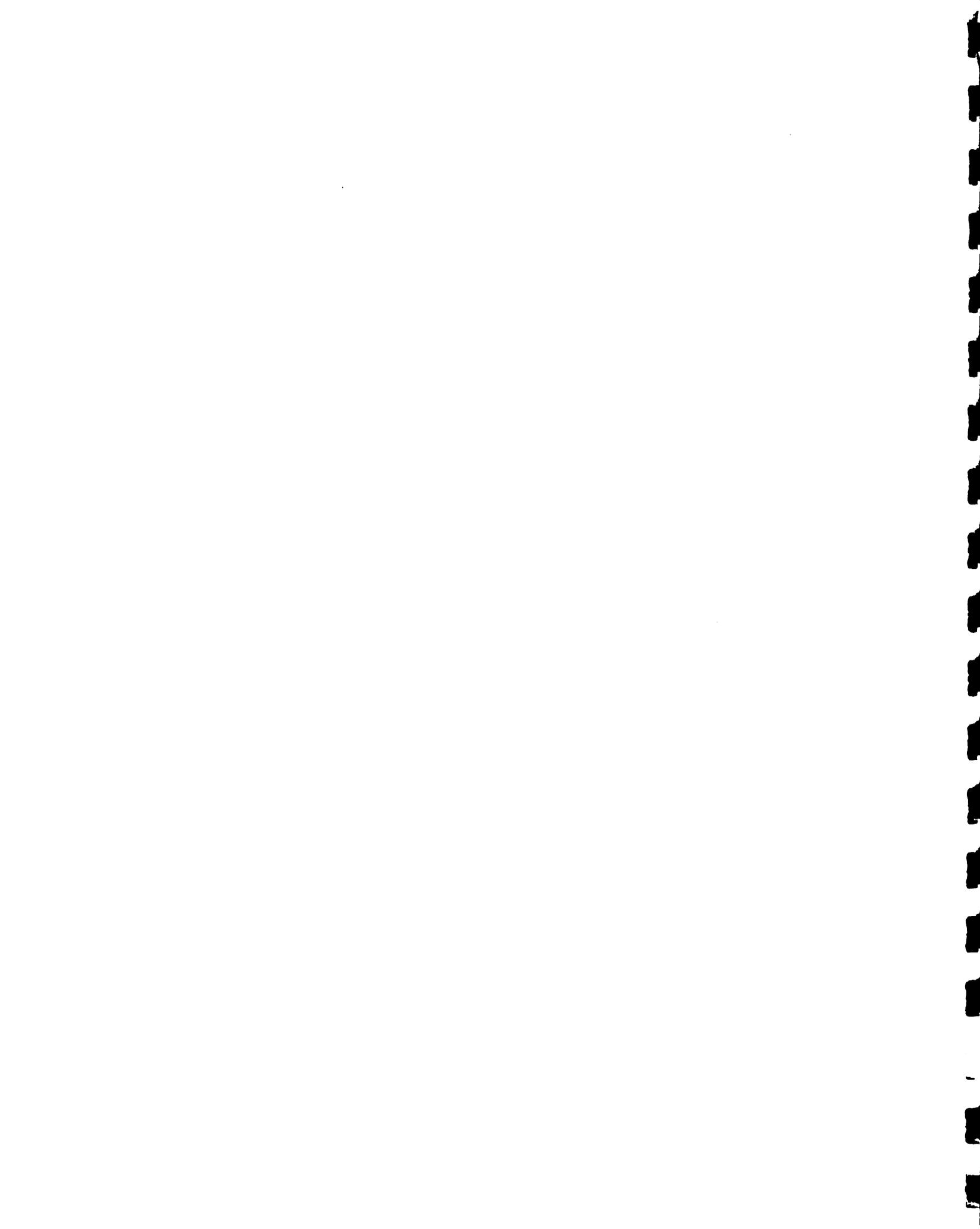


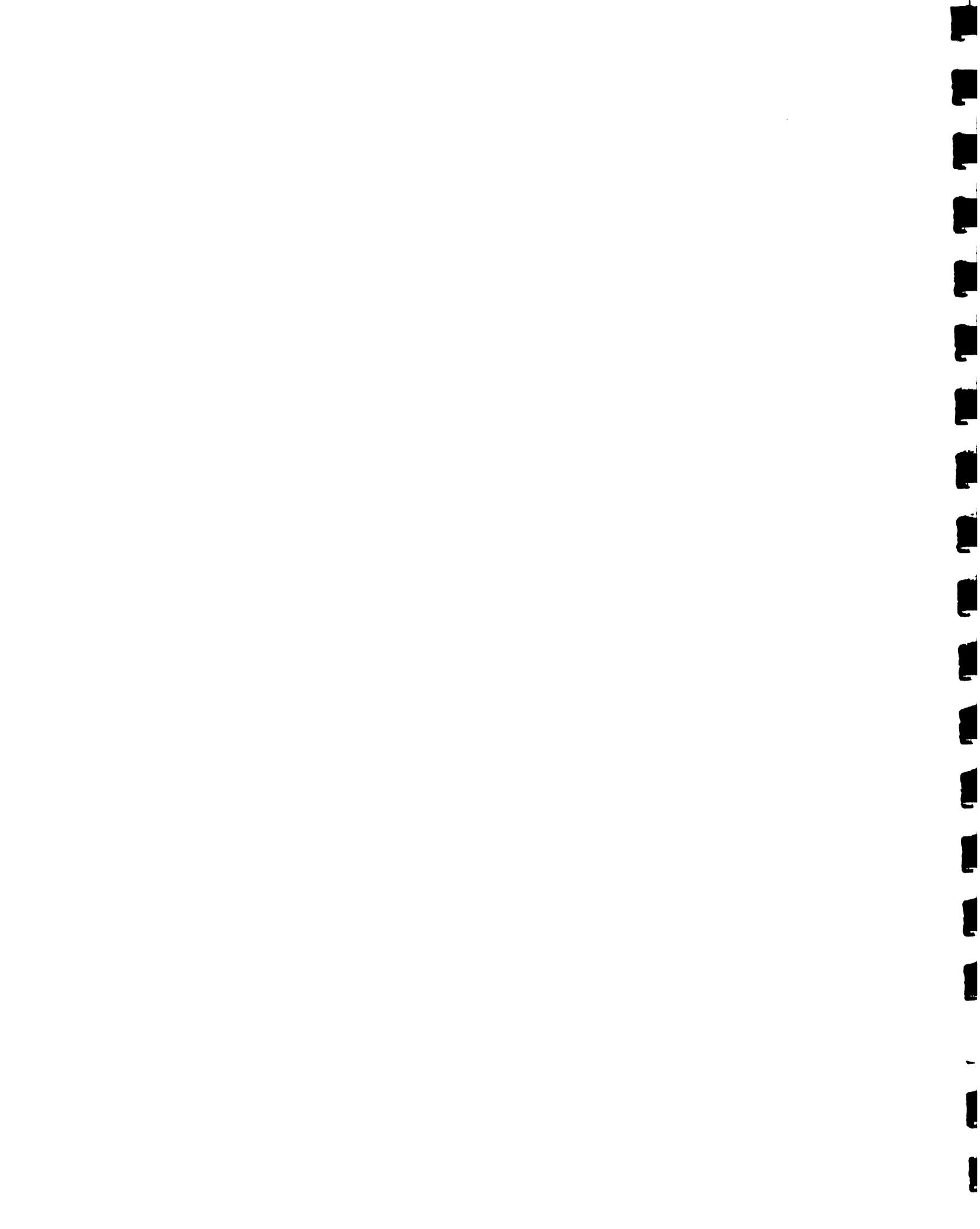
Tabla 11a. Dimensiones de los tanques. Primera alternativa

H (mt)	D(mt)	h(mt)	C(pul)	A(pul)	E(pul)	F(pul)	B(pul)	I(pul)	G(pul)	L(cm)
Para 1 manzana de producción sólo hoja										
0.71	1.00	0.19	3	1/4	1/4	1/4	3	1/4	3	30
Para 2 manzanas de producción sólo hoja										
0.92	1.20	0.27	3	1/2	1/2	1/2	3	1/2	3	30
Para 3 manzanas de producción sólo hoja										
1.49	1.20	0.80	3	1/2	1/2	1/2	3	1/2	3	30
Para 4 manzanas de producción sólo hoja										
1.98	1.20	0.50	4	1/2	1/2	1/2	4	1/2	4	30
Para 5 manzanas de producción sólo hoja										
1.81	1.40	0.49	4	1/2	1/2	1/2	4	1/2	4	30

Tabla 11b. Dimensiones de los tanques. Segunda alternativa.

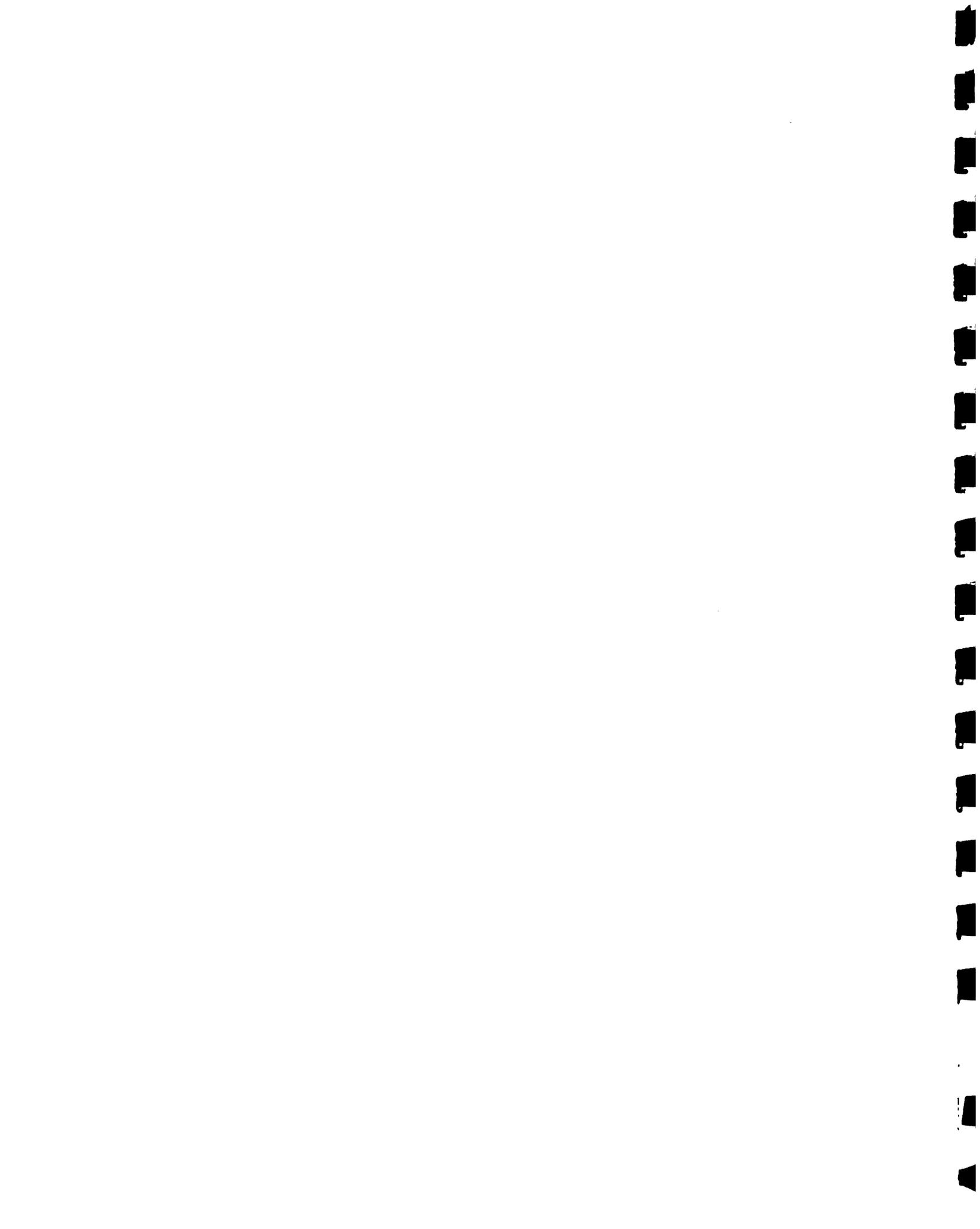
H (mt)	D(mt)	h(mt)	C(pul)	A(pul)	E(pul)	F(pul)	B(pul)	I(pul)	G(pul)	L(cm)
Para 1 manzana de producción sólo hoja										
1.10	0.80	0.30	3	1/4	1/4	1/4	3	1/4	3	30
Para 2 manzanas de producción sólo hoja										
1.10	1.14	0.30	3	1/2	1/2	1/2	3	1/2	3	30
Para 3 manzanas de producción sólo hoja										
1.10	1.40	0.30	3	1/2	1/2	1/2	3	1/2	3	30
Para 4 manzanas de producción sólo hoja										
1.10	1.62	0.30	4	1/2	1/2	1/2	4	1/2	4	30
Para 5 manzanas de producción sólo hoja										
1.10	1.80	0.30	4	1/2	1/2	1/2	4	1/2	4	30

La temperatura es un factor que influye en el asentamiento de las partículas (6). Se estima que al aumentar la temperatura del líquido de trabajo, que en nuestro caso es el agua, la densidad y la viscosidad disminuyen y la velocidad de sedimentación aumenta, condiciones de trabajo que será necesario ensayar para verificarlo.



Bibliografía

- 1- Roberto Gallardo
El obraje de añil de San Andrés
Grupo editorial Siquisiri S.A. de C.V.
México, 1997
- 2- Ana Beatriz Lima Sagastume y otros
**Optimización de la Extracción del Colorante de la Planta de Añil
(Indigofera sp.) para su Utilización en la Industria**
Universidad de El Salvador
El Salvador, 2002
- 4- Francisco José Alarcón y otro
La producción y Comercialización del Añil en Colombia
Anuario Colombiano de historia Social y de la Cultura
- 5- Primer Encuentro Nacional para la Producción, Usos y Mercadeo de
Añil en El Salvador.
Procesamiento del Añil en El Salvador
El Salvador, 2000
- 6- Jairo Alberto Romero Rojas
Potabilización del agua
Editorial Alfaomega, 3ra. Ed., 1999
- 7- NALCO
Manual del agua
Editorial Mc Graw Hill. México, 1989



8- Jorge Arboleda

Teoría y práctica de la purificación del agua

Editorial Mc Graw Hill. 3ra. Ed., Colombia 2000

9- Pendientes de incluir fuentes y direcciones en internet



