



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA



EXAMENES PROFESIONALES
FAC. DE QUIMICA

POSCOSECHA DEL MAIZ EN MEXICO.
EVALUACION DE UNA ALTERNATIVA
EL SILO SOLAR HEXAGONAL

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE

QUIMICO DE ALIMENTOS

P R E S E N T A :

BRUNO EDGAR CHAVEZ MONTES

ASESOR: DR. BALTASAR MENA INIESTA
SUPERVISOR TECNICO: DR. ERNESTO MORENO



MEXICO, D. F.

1997

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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 esta 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.

Jurado asignado:

Presidente Prof. Casillas Gómez Francisco Javier

Vocal Prof. Cornejo Barrera Lucía

Secretario Prof. Mena Iniasta Baltasar

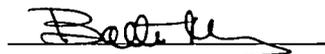
1er. Suplente Prof. Villaseñor Gutiérrez Ruth

2o. Suplente Prof. Cañipa Morales Arnaldo Jimmy

Sitio donde se desarrolló el tema:

Laboratorio de Reología, Instituto de Investigaciones en Materiales, UNAM.
Circuito Exterior s/n, Ciudad Universitaria, México D.F. Coyoacán, 04510

Asesor del tema: Dr. Baltasar Mena Iniasta



Supervisor Técnico: Dr. Ernesto Moreno Martínez



Sustentante: Bruno Edgar Chávez Montes



A mi madre.

*Gracias por todo tu apoyo,
todos mis logros son tuyos.*

Agradecimientos.

Al Instituto de Investigaciones en Materiales, por todo el apoyo brindado para la realización de esta tesis: beca, instalaciones, material de laboratorio, equipo, biblioteca, fotocopiado, impresión, donas, etc., y por permitirme vivir la experiencia, larga pero fructuosa, de la investigación en un instituto serio y competente.

A Fundación UNAM, con quien me siento hondamente comprometido, por las aportaciones económicas desde el Servicio Social hasta la Tesis de Licenciatura.

Al Dr. Baltasar Mena y a todo su equipo de trabajo del laboratorio de Reología del IIM, por aceptar a un Químico de Alimentos en sus filas, y por haberme enseñado cada día algo nuevo.

Al Programa Universitario de Alimentos, por la facilitación de información, y en especial al Dr. Ernesto Moreno, por su valiosa asesoría en el desarrollo de la tesis, su tiempo y su inacabable amabilidad.

A Omar Galicia (Brolo), por su indispensable ayuda y compañía durante toda la elaboración de la tesis, y con quien hice apreciable amistad.

A la Facultad de Química, por la educación que me brindó con todo lo bueno y lo malo, y a mis profesores por construir mi persona, mi saber y mi corta pero valiosa experiencia.

A mis compañeros(as) de la carrera, por su complicidad en mis desvelos, mis tareas, mis calificaciones, mis dudas, mis apuntes, mis errores y aciertos, en especial a Ivette y Brian con quienes hice siempre el mejor equipo.

A Adela Castillejos, primero por enseñarme y después por dejarme enseñar, por su ayuda y por ser siempre un extraordinario ejemplo como docente, como universitaria y como persona.

A mi familia, porque sé que cuento con ella en todo momento.

A EFE Asesores, en especial a todos los Echavarría y a Carlos Franco, por mantenerme ocupado y engrosar mi cartera durante las vacaciones, por los copiosos festejos a los que fui invitado, pero sobretudo por su oportuna ayuda cada vez que la necesité.

Contenido

INTRODUCCIÓN	1
ANTECEDENTES	2
1.1.- ANTECEDENTES HISTÓRICOS	2
1.2.- LA ECONOMÍA AGROPECUARIA EN MÉXICO	3
1.2.1.- Soberanía alimentaria	7
1.2.2.- Privatización, T.L.C. y repliegue estatal: ¿al rescate del campo?	8
1.2.3.- Efectos de la estrategia neoliberal	11
1.3.- EL SISTEMA POSCOSECHA	13
1.3.1.- La organización del campo	13
1.3.2.- El sistema poscosecha	14
1.3.3.- Una infraestructura deficiente	16
1.3.4.- Pérdidas poscosecha, el problema central.	19
1.3.5.- El panorama actual	21
1.4.- NECESIDADES Y PROPUESTAS	22
1.4.1.- La organización ideal	22
1.4.2.- Algunas propuestas	23
II.- EL MAÍZ, CEREAL DE IMPORTANCIA MUNDIAL	25
2.1.- CONSUMO DE MAÍZ EN MÉXICO	27
2.2.- UN NUEVO TIPO DE SILO	28
III.- CALIDAD DE LOS GRANOS, FACTORES QUE LA AFECTAN	31
3.1.- HUMEDAD DE LOS GRANOS	34
3.1.1.- Humedad de equilibrio	35
3.1.2.- Actividad del agua	36
3.2.- INDICADORES DE CALIDAD COMERCIAL	38
3.3.- MICROFLORA DE LOS GRANOS ALMACENADOS	41
3.4.- INSECTOS DE LOS GRANOS ALMACENADOS	46
3.5.- ROEDORES	49
3.6.- CONTROL INTEGRAL	50
3.7.- EL PROCESO RESPIRATORIO	52
3.7.1.- Factores que afectan la respiración	54
3.7.2.- Consecuencias del proceso respiratorio	55
3.8.- MUESTREO	55
IV.- LA CADENA DE POSCOSECHA	57
4.1.- LIMPIEZA	58
4.2.- EL PROBLEMA DE LAS PÉRDIDAS	59

Contenido

<i>V.- SECADO</i>	61
5.1.- SECADO EN EL SILO	62
5.1.1.- Deterioro del producto	66
5.1.2.- Flujo de aire para el secado	67
5.1.3.- Resistencia de los granos al flujo de aire	69
5.1.4.- El proceso de secado	72
5.2.- SECADO CON ENERGÍA SOLAR	73
5.2.1.- Colector de energía solar	74
5.2.2.- Construcción de un colector solar.	77
5.2.3.- Flujo de aire	80
5.2.4.- Perspectivas del secado con energía solar	80
<i>VI.- ALMACENAMIENTO CON AIREACIÓN</i>	82
6.1.- AIREACIÓN DE LOS GRANOS	82
6.1.1.- Importancia de la aireación	83
6.1.2.- Estructura del sistema	84
6.1.3.- Problemas a considerar en la aireación	89
6.1.4.- Beneficios de la aireación	90
6.2.- AIREACIÓN EN EL SILO	92
6.3.- CONTROL INTEGRAL DE LOS SISTEMAS DE SECADO Y AIREACIÓN	94
<i>VII.- ALTERNATIVAS DE ALMACENAMIENTO</i>	96
7.1.- ALMACENAMIENTO HERMÉTICO Y CON ATMÓSFERA CONTROLADA	96
7.2.- ALMACENAMIENTO DE GRANOS CON ALTA HUMEDAD	97
<i>VIII.- EVALUACIÓN DEL SECADO EN EL SILO</i>	101
8.1.- EVALUACIÓN TEÓRICA	101
8.2.- ESTUDIO DE CASOS	106
<i>IX.- EXPERIMENTACIÓN</i>	116
9.1.- MATERIALES Y EQUIPO.	116
9.2.- INSTRUMENTACIÓN.	117
9.3.- METODOLOGÍA	119
9.4.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN	122
<i>CONCLUSIONES</i>	133
<i>REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA.</i>	135

INTRODUCCIÓN

A pesar de que el maíz en México es un símbolo de identidad nacional, sustento de millones de familias campesinas y base de la alimentación de los mexicanos, el accionar económico moderno ha conducido a la aplicación de amenazantes esquemas neoliberales, que ponen en riesgo lo que no hace mucho ha dejado de ser uno de los pilares de nuestra economía productiva, el cultivo y la comercialización del maíz. El cese del apoyo gubernamental junto con la pretensión de reconcentrar la tierra -cuyo supuesto lema es levantar del letargo a la agricultura mexicana- al parecer no sólo no está cumpliendo con su objetivo sino que podría arrastrar al país hacia una peor crisis rural y una creciente dependencia del extranjero. Ante tal incierto panorama, es necesario unir esfuerzos en pos del hallazgo de soluciones políticas, económicas y tecnológicas realmente eficaces, en defensa de nuestra soberanía alimentaria.

Omitiendo la cuestión política, el problema que padece la economía del maíz es consecuencia directa de una ineficiente y mal organizada cadena de su posproducción en la cual suceden pérdidas cuantiosas en cantidad y calidad desde que se cosecha hasta que llega al consumidor. Estas mermas ocurren principalmente durante el acondicionamiento del grano previo al almacenamiento y durante este último. Una solución técnica y económicamente favorable al problema de la conservación del grano es el silo solar hexagonal, diseñado en el Instituto de Investigaciones en Materiales de la UNAM por el grupo de trabajo del Dr. Baltasar Mena. El silo minimiza las pérdidas de grano por daños mecánicos, reduce costos de fabricación y cuenta con un sistema de secado solar y aireación, el cual permite preservar al producto libre de plagas, manteniendo su óptima calidad de manera económica y ecológica.

El presente trabajo evalúa de manera global la viabilidad del silo solar hexagonal, como una solución ventajosa al problema del almacenamiento del maíz en México. Se analizarán sus ventajas y desventajas y se prestará particular atención al funcionamiento del sistema de secado solar y de aireación, dos operaciones vitales en la conservación del grano.

CAPÍTULO PRIMERO

ANTECEDENTES

1.1.- ANTECEDENTES HISTÓRICOS

El nacimiento de los pueblos que habitaron el territorio que más tarde se llamaría México está vinculado con el origen del maíz. Los mitos más antiguos de Mesoamérica narran que el mundo que hoy habitamos fue creado por los dioses del maíz, quienes concibieron a los seres humanos y les dieron el alimento para sustentarlos.

El hecho de que la cosmogonía maya se refiera a la creación del cosmos como un alumbramiento agrícola en el que la humanidad brotó de la masa del maíz, muestra que para los pueblos más antiguos, la civilización nació con los orígenes de la agricultura y el cultivo de este cereal.

El maíz representa así un elemento de identidad, tradición y arraigo muy importante de la cultura pasada y presente del pueblo mexicano.

Más notoriamente en el siglo XX, surge la necesidad en todo el mundo de producir granos cada vez en mayores cantidades y de mejor calidad, lo que resultó en la planeación y aplicación de programas agrícolas intensivos en los países desarrollados (Norteamérica principalmente) y el bloque entonces socialista (URSS y China). Mientras tanto el Tercer Mundo luchaba penosamente contra su rezago, sumergido en problemas políticos y económicos.

El modelo del "farmer" norteamericano y su eficacia productiva contrastaba con los enormes esfuerzos de los campesinos tradicionales del Tercer Mundo, quienes todavía continuaban extenuándose hasta la muerte, para producir bajísimos volúmenes de granos que apenas alcanzaban para alimentar a una población que crecía aceleradamente. A estos países del Tercer Mundo nos vendieron el espejismo de la Alianza para el Progreso y con ella la Revolución Verde.

El esquema de bajos rendimientos fue superado supuestamente con la aplicación de agroquímicos, tractores y modelos de producción intensiva apoyada en el riego. México no escapó a todo este esquema y todo ello hubiera resultado eficaz si tuviéramos una geografía menos arrugada y una mejor organización del campo. A medida que el tiempo demostraba que la Revolución Verde no se adecuaba al contexto nacional, las estrategias económicas para el campo pasaron del consumo productivo a la sofisticación corporativa del gobierno para proveer el capital, insumos y redes de distribución y comercio, que han conducido a la ruina de amplios sectores sociales.

La imposición de esquemas productivos eficientistas y modernos han trastocado el equilibrio no sólo social, sino también del medio ambiente. La adopción de la tecnología agrícola derivada de tales estrategias ha contaminado la tierra y los mantos acuíferos, y los bosques han sido talados. Así, de la Revolución Verde a la actualidad, México perdió dramáticamente su imagen de país rural, convirtiéndose en una mala copia de país desarrollado, urbano y sobrepoblado.

Según la FAO (Food and Agriculture Organization) los países de Latinoamérica tienen amplio potencial de desarrollo agrícola el cual no se aprovecha, y México no es una excepción¹, pero es un hecho que desde los setentas la pobreza urbana ha crecido y seguirá aumentando a causa del éxodo rural, un fenómeno ya cotidiano totalmente opuesto al espejismo del "desarrollo agrícola". La impotencia de los países latinoamericanos, incluido México, para desarrollar sus campos no es más que un reflejo de sus economías siempre presionadas, y que siguen eternamente un camino equivocado.

1.2.- LA ECONOMÍA AGROPECUARIA EN MÉXICO

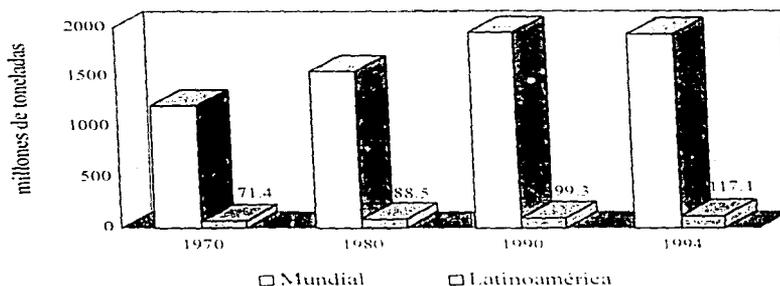
En vez de ser aprovechadas, las tierras con potencial agrícola prefieren ser abandonadas para agravar el éxodo rural, mientras el desarrollo del país sigue dependiendo en gran parte de la agricultura, actividad cuyo fin es la alimentación de los habitantes de un pueblo. Tan importante es este trabajo, que del total de la población mundial el 44% está dedicada a la agricultura (ver cuadro 1.2.1).

Cuadro 1.2.1.- Población dedicada a la agricultura

Mundo	44.3%
Países desarrollados	7.5%
Países en desarrollo	55.4%
Estados Unidos	2.5%
América Latina	25.4%
México	34.4%

Fuente: elaboración propia con base en Arias C., *Almacenamiento de granos en Latinoamérica, en El sistema poscosecha de granos en el nivel rural: problemática y propuestas*, PUAL, México, pp. 233.

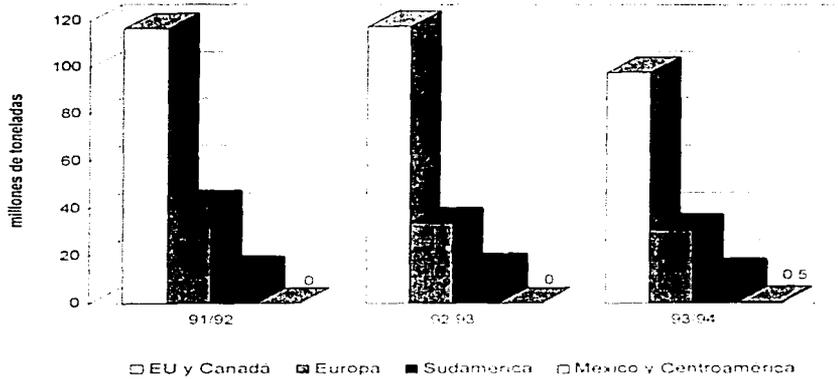
Aun cuando la población agrícola en los países latinoamericanos representa un alto porcentaje, y como en todo el mundo el sustento de su dieta son los cereales (maíz y trigo), su producción no alcanza el 10% de la producción mundial, renglón en el que son muy superiores países desarrollados como los Estados Unidos, Rusia y Canadá (ver gráfica 1.2.1).

Gráfica 1.2.1.- Producción de cereales en Latinoamérica²

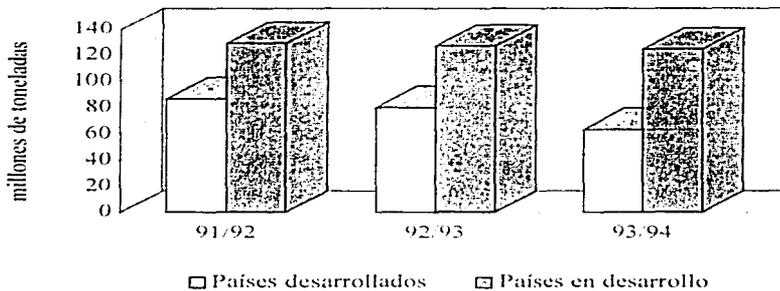
Hasta los años 70, la actividad agropecuaria representaba un generador de divisas para nuestro país, situación que se ha revertido desde los 80's, pues desde entonces México se ha convertido en país

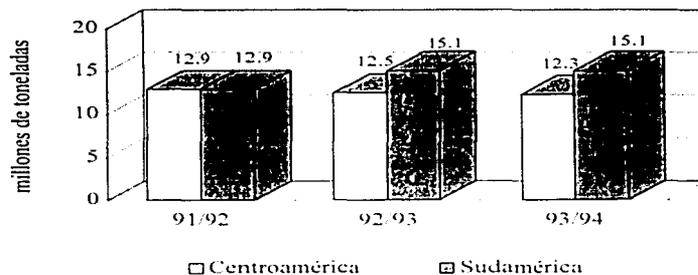
importador, con balanza comercial negativa en ese renglón, lo cual se generaliza también en Latinoamérica (ver gráficas 1.2.2 a 1.2.4).

Gráfica 1.2.2.- Exportación de cereales².

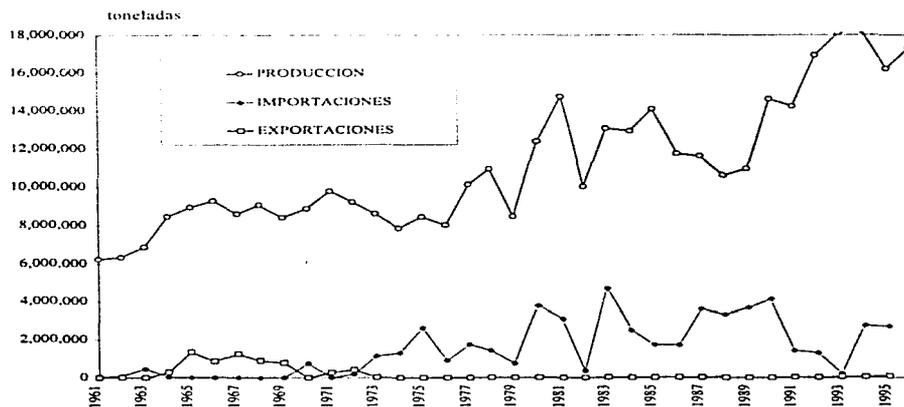


Gráfica 1.2.3.- Importación de cereales en países desarrollados y en desarrollo².



Gráfica 1.2.4.- Importación de cereales en Latinoamérica².

En México la situación es clara: por mucho, el grano que más se consume y produce es el maíz. Sin embargo a pesar de que su producción se ha incrementado más o menos sostenidamente en las últimas tres décadas, las importaciones de maíz también lo hacen (ver gráfica 1.2.5).

Gráfica 1.2.5.- Producción e intercambio comercial de maíz en México (1961-1995)²

Mientras, las exportaciones alguna vez generadoras de divisas, al igual que nuestra soberanía alimentaria, ahora no son más que un recuerdo sesentero que al parecer nunca volverá.

Aunque otros sectores productivos se fortalecen ante el descuido de la agricultura, México difícilmente volverá a conocer la autosuficiencia alimentaria. Esta debería ser un objetivo prioritario en la política económica de cualquier país, pues es una forma de buscar su soberanía misma.

1.2.1.- Soberanía alimentaria

En el mundo, globalmente, se produce lo que se necesita. El problema radica empero en la distribución de los recursos. En materia de alimentos, la situación es clara: los países en desarrollo cada vez son menos capaces de satisfacer sus demandas, lo que los lleva a importar costosamente los excedentes de los países desarrollados que controlan el mercado alimentario.

La soberanía alimentaria es una meta de los países en desarrollo. "la no dependencia alimentaria es el ideal de cualquier pueblo para defender no sólo su soberanía alimentaria, sino también su soberanía nacional"³. Sin lugar a duda uno de los pasos importantes para el logro de tal objetivo es la autosuficiencia en alimentos básicos; entre ellos destaca el maíz, grano de vital importancia para muchos pueblos latinoamericanos, incluido México por supuesto.

La autosuficiencia en maíz es un aspecto de particular relevancia para la paz social de los países como México, donde este grano es producido por agricultores de recursos económicos precarios, ya que constituye la base alimentaria de la familia rural y representa el sostén de la economía campesina de autosubsistencia. Así, el bienestar de los campesinos viene a ser vital para la estabilidad económica y social de los países, y dada su situación de pobreza y marginación, es necesario que se unan en la promoción de su propio desarrollo.

Pero la prioridad del gobierno, que es razonable, es la seguridad alimentaria de la población mexicana, es decir "la capacidad para garantizar el acceso de la población a los alimentos que satisfagan sus necesidades nutritivas y permitan su sano desarrollo físico y mental"⁴. Este concepto está cada vez más

interrelacionado con el acceso al mercado mundial, sin embargo la política alimentaria sigue dando absoluta prioridad a la oferta de alimentos económicos para la población urbana y a disminuir el gasto en subsidio rural, por lo cual el abasto de granos baratos provenientes del mercado norteamericano es la vía más eficiente en la lógica neoliberal⁵. La tendencia es clara: se avecina una apertura y una dependencia creciente del abasto exterior.

"Desde el punto de vista de las actuales corrientes económicas, la autosuficiencia de la producción agrícola no es un objetivo primordial, si existen otros sectores que generen las divisas necesarias para las importaciones. Desde el punto de vista de la seguridad alimentaria, esta deficiencia conduce a una cierta dependencia alimentaria que puede ser poco saludable para los países"⁶.

Para alcanzar el objetivo de mayor interés nacional, que es la soberanía alimentaria, deben efectuarse con eficiencia la producción y poscosecha de granos, con la intervención de "decisiones políticas y económicas comprometidas con el bienestar de los pueblos, y muy en particular de la población rural y urbana de escasos recursos económicos"³. Pero la liberación de nuestro comercio agropecuario con el Norte (potencias alimentarias) cancela los propósitos nacionales de seguridad y soberanía alimentaria, aspectos que habían sido defendidos con relativo éxito en el Acuerdo General de Aranceles Aduaneros y de Comercio (GATT). Empezando con De La Madrid y abiertamente durante el mandato de Carlos Salinas, las corrientes neoliberales le dan la espalda al campo, y le abren las puertas al capital privado. Entrando en la nueva era económica del Tratado de Libre Comercio, el futuro de millones de campesinos mexicanos pronto estará en manos casi exclusivamente de la iniciativa privada, nacional y extranjera.

1.2.2.- Privatización, TLC, y repliegue estatal: ¿al rescate del campo?

Algunas de las causas principales de las transformaciones del agro mexicano fueron los cambios que se dieron en la política gubernamental, la cual sufrió recortes presupuestales importantes con los que vio mermados sus ingresos tanto en términos absolutos como en la parte porcentual que tradicionalmente ocupaba en el gasto público del sector agropecuario. La reducción de los volúmenes de crédito rural, la

elevación de las tasas de interés y una reasignación de los recursos financieros, concentrándolos en el sector empresarial, afectó tremendamente a los productores rurales.

Desde 1985, Conasupo dejó de funcionar como el único importador legal de productos estratégicos y se redujo, desde 1988, el conjunto del Sistema Conasupo: su estructura de almacenamiento, controlada por su filial Borueonsa, fue privatizada casi en su totalidad, transferida en algunos casos a las organizaciones de productores. A la vez, se vendieron agroindustrias e instancias específicas de comercialización: Immecafé (café), Tabamex (tabaco), ingenios azucareros, Fertimex (fertilizantes), Alimentos Balanceados (alimento para ganado), etc. Con este proceso de privatización no sólo se vieron afectados la mayor parte de los productores, sino también una proporción importante de la población rural compradora neta de alimentos.

Por otra parte, desde 1987 desaparecen los precios de garantía de los principales granos y con ello decrecen los cultivos de oleaginosas y arroz, incrementándose los de maíz y frijol, que, aunque poco atractivo, aún conservarían precio de garantía hasta 1996. De este fenómeno es buen ejemplo el estado de Sinaloa, que en los años 80 no alcanzaba una producción de 200,000 toneladas anuales, mientras que ahora es uno de los principales productores de maíz en México, alcanzando unos 3 millones de toneladas/año.

Desde principios de 1995 los precios de garantía para el maíz y el frijol son prácticamente ignorados por los productores, ante la imposibilidad de Conasupo de competir con las empresas privadas en las compras nacionales. Conasupo deja definitivamente de ser comprador mayoritario de maíz dando lugar al acaparamiento del sector privado, principalmente Maseca y Minsa.

En los ochentas se venía entonces dibujando una escena rural marcada por el creciente abandono gubernamental, la crisis económica y el estancamiento de la productividad, que predomina hoy en día.

Las causas del desastre agrícola fueron trastocadas, inculpándose al ejido como causante. En la concepción neoliberal del gobierno se intenta condenar a los pequeños productores rurales al rincón de las categorías sociales caducas, al ubicarlos como una anomalía residual y en vías de desaparición.

dentro de la sociedad contemporánea y son considerados improductivos y faltos de perspectivas en el contexto de la nueva economía globalizada.

En consecuencia, fue decretada una contrarreforma agraria neoliberal modificando al artículo 27 constitucional, con lo que se rompe el contrato social de la Revolución Mexicana, al dar por terminado el reparto agrario, al suprimir el carácter patrimonial de la propiedad campesina ejidal y comunal y al abrir múltiples vías a la reconcentración de la tierra. Se impulsa así un nuevo modelo de desarrollo agropecuario sustentado en la nueva Ley Agraria, las medianas, grandes y gigantescas explotaciones y la operación en economía abierta formalizada por el TLC.

Empezando desde el sexenio de De La Madrid y abiertamente puesta en marcha en 1987, la modernización económica comprendió en el sector agropecuario un programa de liberalización, cuyas vertientes principales son:

- La severa reducción de la participación del Estado en el fomento económico sectorial.
- La apertura comercial externa que remató en la inclusión completa del sector agropecuario en el TLC de América del Norte.
- La reforma neoliberal del artículo 27 constitucional y de su ley agraria reglamentaria, que abrió múltiples vías para el comercio de las tierras ejidales y comunales, así como para la concentración de la tierra en grandes unidades de producción.

Con esta estrategia el gobierno pretendía "revertir el minifundio para estimular una mayor inversión y capitalización de los predios rurales, que eleven la producción y productividad".

No obstante lo anterior, las causas del desastre agrícola derivan de los principales puntos del programa neoliberal:

- La apertura comercial que ha hecho descender los precios reales de numerosos productos, así como la rentabilidad del sector agropecuario.
- El abrupto repliegue del Estado de sus responsabilidades en la promoción del desarrollo agropecuario, reflejado en la disminución de las inversiones de infraestructura y del fomento rural.
- El escaseamiento y encarecimiento del crédito.

En las naciones donde escasea el factor trabajo y abundan la tierra y el capital, el modelo idóneo de desarrollo agropecuario es el basado en unidades de producción de gran tamaño, que maximizan el rendimiento del factor trabajo. Pero en naciones donde abunda la mano de obra y escasean la tierra y el capital, como es el caso de México, es un desatino inducir un modelo similar, tal y como lo hizo la tecnocracia neoliberal, ya que se condicionaría el aumento del factor trabajo, presionando a la baja los salarios y manteniendo la inequidad en la distribución del ingreso nacional.

La concentración de las tierras no cumple necesariamente con el propósito de elevar la producción y la productividad. La historia ha mostrado que modelos basados primordialmente en pequeñas explotaciones (Comunidad Económica Europea CEE) resultan en la elevación de la producción, la productividad y el abasto interno de alimentos, y al mismo tiempo en mayores beneficios sociales que los modelos basados principalmente en grandes y medianas explotaciones (como EU y Brasil).

1.2.3.- Efectos de la estrategia neoliberal

A la crisis agrícola se sumó una crisis política: el alzamiento campesino de Chiapas cuyo detonante fue precisamente, según señaló el subcomandante Marcos, la reforma salinista del artículo 27 constitucional.

Lo que ahora está resultando ante la apertura comercial, es que el 85% de los productores rurales no están en condiciones de sobrevivir en el mercado y será inminente el abandono de la tierra de 4 o 5 millones de ellos para nutrir los cinturones de miseria en las ciudades. Pero en cambio con las nuevas políticas agrícolas se "fortalecerá" el sistema comercial. Al caer el precio de las tierras se facilitará su compra y las granjas empresariales de gran escala, mexicanas o extranjeras, acaparán las tierras de campesinos y agricultores mexicanos de modesta producción (de menos de 200 ha. o sea la mayoría). De esta manera se dará luz verde al apoyo y estímulo a la inversión con ejidatarios y comuneros con miras en la privatización de sus tierras. Con esto aumentará el número de familias sin tierra y paralelamente la mecanización del campo por lo que se multiplicará la oferta de mano de obra, mientras que difícilmente habrá aumento de oferta de empleo.

Así, mientras países sudamericanos como Chile, Argentina y Brasil son exportadores, los niveles de exportación de México son iguales a cero desde el ciclo 91/92.

Al parecer se debe esperar la desaparición de nuestros más importantes granos básicos (maíz y frijol) a causa de la enorme superioridad de los costos de producción en México -dado que sólo el 4.85% de los productores de maíz produce a menos de 170 USD/tonelada de maíz- y por lo tanto el aumento paulatino de las importaciones del grano.

El libre comercio granero implicará el retiro del cultivo de más de 10 millones de hectáreas y un éxodo rural de alrededor de 3 millones de familias campesinas. La implantación de "un modelo de desarrollo agropecuario basado en la concentración de la tierra provocará estragos sociales despiadados que no podrán ser amortiguados en otros sectores de la economía"⁷.

"El costo más grave del TLC, sería perpetuar nuestra dependencia alimentaria: tan sólo en 1988 y 1989, nuestras importaciones de alimentos representaron más de la mitad de nuestras exportaciones petroleras, y en 1990 significaron más de tres veces el ahorro conseguido por México en sus pagos anuales de intereses durante la negociación de la deuda externa"⁷.

Si la tendencia histórica de los campesinos es su desaparición, con ellos también se perderá un conocimiento racional y de respeto a la naturaleza. Pero queda una pregunta de mayor impacto: si la desaparición de los campesinos es una verdad con futuro, entonces ¿quién y cómo se alimentarán a los 100 millones de mexicanos que seremos en el año 2000?

La respuesta no está toda en manos del gobierno, la desatinada economía agrícola también es producto de la compleja organización del campo mexicano y el sistema de poscosecha, que vistos fuera del contexto económico, son un mosaico de rezagos, desorganización, carencias y corrupción, en donde participan tanto autoridades como campesinos, intermediarios, empresarios, científicos, etc.

1.3.- EL SISTEMA POSCOSECHA

1.3.1.- La organización del campo

En México existen múltiples formas de tenencia de la tierra, pero las siguientes son las más extendidas:

- 1.- Comunidad
- 2.- Ejido
- 3.- Propiedad (pequeña, mediana, grande)
- 4.- Otros (rentistas, acasillados, etc.).

La comunidad y el ejido son dos modalidades básicas, esto es, 29,951 unidades que agrupan a 3,022,340 productores que detentan el 52% del territorio nacional: 1,028.768 km². Considerando exclusivamente a ejidatarios y comuneros, en principio pueden hacerse los siguientes tres conjuntos, basados en la clasificación de CEPAL, sobre ejidatarios y comuneros para 1990:

- 1.- Productores de autoconsumo
- 2.- Productores diversificados
- 3.- Productores comerciales.

Los productores orientados al autoconsumo son minifundistas con prácticas mágico-religiosas alrededor de la agricultura, con utilaje indocolonial y con poco uso de agroquímicos y cuya producción se destina al autoconsumo humano y productivo y parcialmente al mercado (35%). Siembran con el temporal y en su gran mayoría en sistema de milpa (maíz y frijol, intercalados), en algún momento de marzo a mayo y se cosecha, según se haya sembrado, de agosto a septiembre.

En su sistema, su racionalidad no es hacia la producción para la venta y ganar así dinero, sino obtener lo que necesitan para alimentarse y como estrategia para resolver sus problemas de almacenamiento venden parte en el mercado, mismo en el que compran a lo largo del año el maíz que necesitan.

Los productores diversificados siembran también café en adición al maíz y frijol. El maíz es alimento humano y el café es producto de venta. A pesar de su diversificación y de sembrar además del maíz

algún cultivo comercial (vainilla, tabaco, frutas) su nivel económico es sólo un poco superior a los tradicionales.

Los campesinos abiertos al comercio generalmente no siembran maíz, sólo el necesario para el autoconsumo.

De manera global la agricultura maicera es predominantemente minifundista, dado que el 70% de los predios maiceros son menores de 5 ha y, para el maíz temporalero menos del 15% de la cosecha del ciclo fuerte (primavera-verano) se obtiene en predios mayores de 10 ha.

1.3.2.- El sistema poscosecha

El maíz se cultiva a lo largo de todo el país pero sólo algunas entidades generan elevadas producciones: Chiapas, Chihuahua, Guanajuato, Jalisco, México, Tamaulipas, Veracruz y Sinaloa recientemente. Todo el resto del territorio debe abastecerse de sus excedentes y de las importaciones. Considerando que tradicionalmente en México la producción de maíz la llevan a cabo los pequeños productores de escasos recursos, el manejo que ellos le dan en sus campos posteriormente se reflejará en la calidad del grano, que se comercializa en los centros urbanos de consumo y de industrialización.

Pero "los análisis" del sistema poscosecha "corrientemente difundidos ofrecen una panorámica difusa para los no especializados en el tema, por lo cual pasan inadvertidos o insuficientemente valorados"⁸.

El sistema poscosecha puede explicarse, *grossa modo*, a partir de la existencia de dos formas de producción: la de autoconsumo (rural) y la comercial.

Desde el punto de vista histórico y económico es en las comunidades indígenas y en las familias campesinas donde se sustenta el sistema de autoconsumo. Dichos grupos producen bajos volúmenes de granos (de 2 a 4 toneladas.); las propiedades de ejidatarios y comuneros son de 3.6 ha en promedio y pueden cosechar alrededor de 3 t. de maíz, con un rendimiento pobre de 0.8 a 1 t./ha. La cosecha es

secada naturalmente, generalmente desgranada en forma manual, y finalmente se limpian antes de ser guardados.

Los productores de autoconsumo almacenan con dificultades la gran parte de su propio consumo en graneros improvisados o en parte de la casa destinada para tal efecto, y venden el resto para satisfacer sus necesidades básicas. Pero generalmente se ven obligados a vender parte de lo que destinan a su consumo, y cuando se les acaba el maíz, tienen que recomprarlo al mercado pagando un sobreprecio.

Esta secuencia implica desde el secado a la intemperie la infestación y deterioro del maíz a causa de hongos, insectos, roedores y hasta pájaros. El producto resultante será entonces de baja calidad y por lo tanto de bajo precio, lo que finalmente se traducirá en un pago miserable al campesino por su producto, que será castigado por el deterioro y las impurezas.

El sistema comercial sustenta su base en agricultores que no solamente buscan reducir pérdidas en las etapas posteriores a la producción del grano, sino que pretenden obtener beneficios en cada una de ellas, a través de mejoras en el acondicionamiento (limpieza y secado), comercialización y transporte. Este sector antes dominado por instituciones estatales, ahora se conforma primordialmente por tres grupos, en orden de importancia:

- Privado
- Paraestatal (ANDSA)
- Oficial (Boruconsa)

Las dos últimas empresas se encuentran sin embargo en vías de desaparición. En el cuadro 1.3.2 se da una idea de las profundas diferencias entre las dos modalidades del sistema poscosecha.

Cuadro 1.3.2.- Diferencias generales entre los sistemas de producción rural y comercial.

Sistema rural	Sistema comercial
Semilla tradicional	Semillas mejoradas
Poco uso del riego y fertilizantes	Acceso al riego y fertilizantes
Tierra marginal , laderas de fuertes pendientes, de bajos rendimientos	Tierras generalmente de buena calidad, mayor rendimiento y diversificación.
sin acceso al crédito	Crédito accesible
almacenes rústicos, poca protección contra plagas	Acceso a silos y bodegas
necesitan apoyo gubernamental por falta de competitividad.	Acceso a apoyos del gobierno y adaptación a los cambios de mercado

Fuente: elaboración propia, basada en Moreno E., *El sistema poscosecha de granos en el nivel rural, problemática y propuestas*, PU'AL, 1995, pp. 234

Los dos sistemas coexisten por separado, con intereses y recursos diferentes, sin retroalimentarse pero sí afectándose mutuamente.

1.3.3.- Una infraestructura deficiente

Hay quienes afirman que las cosechas mexicanas son suficientemente sanas, limpias y secas como para permitir su almacenamiento seguro, sin peligro de verse invadidas por plagas. Sin embargo, pensar de tal forma significaría ignorar primero un problema real que es la pérdida de calidad de los granos casi automática desde su cosecha y, segundo la importancia del acondicionamiento. "No se puede pedir ni tener calidad en los granos y demás productos agrícolas, si no se tiene la infraestructura física adecuada para lograr tal propósito"³.

Después de su cosecha los granos deben de acondicionarse. Se entiende por acondicionamiento al conjunto de operaciones mecánicas y químicas al cual son sometidos los granos desde su cosecha hasta el momento de almacenarse. Incluye principalmente limpieza (de impurezas, granos rotos, insectos, etc...) y secado pero también medidas preventivas como la aplicación de insecticidas. El

acondicionamiento adecuado evita pérdidas pero puede resultar incosteable si se aplica a bajos volúmenes de grano, mismos que manejan la mayoría de los productores.

En general, se puede decir que la infraestructura que sustenta al sistema poscosecha mexicano es insuficiente en cantidad y en calidad, para almacenar todos los granos que se producen y menos para los que se importan. Esto conlleva a acciones emergentes como la renta de bodegas, generalmente inadecuadas para el almacenaje de granos, o el montaje provisional de estructuras a la intemperie, en las que en el mejor de los casos se cubren los granos con lonas.

Estas medidas sólo resuelven temporalmente el problema sin atacar sus raíces. Además los almacenes están en mal estado, muchas veces requieren grandes inversiones para su operación sin que siempre resulte en la buena calidad del grano.

Ante el avance del TLC y el incremento de las importaciones la insuficiencia de capacidad se agravará. La falta de espacio se observa desde los centros de acopio que reciben provisionalmente el grano para trasladarlo a las grandes bodegas, son "instalaciones rústicas con pocas facilidades de descarga, acondicionamiento y almacenaje"⁸. La reducida capacidad de estos centros resulta, durante la época de cosecha, en su rápida saturación y la necesidad de implantar acopios a la intemperie por largos periodos. Existe un déficit de 3 a 4 millones de toneladas de capacidad de almacén y además el existente no se ha mantenido ni modernizado.

No existe un organismo central que determine y difunda todas aquellas prácticas y recursos que deben tenerse en cuenta para almacenar granos en México. La mayoría de los almacenes por lo general sólo cumplen funciones de compraventa, sin que necesariamente mantengan las condiciones adecuadas de conservación. Las bodegas tecnificadas son minoría y casi siempre utilizadas por el sistema comercial privado, encabezado por ANDSA (véase cuadro 1.3.3).

Cuadro 1.3.3.- Empresas almacenadoras mexicanas y su participación.

Empresa	Volumen almacenado (% del total)
ANDSA	62 %
Almacenadora S.A.	10.5 %
Monterrey	7.8 %
SOMEX	2.8 %
Otras (Serfin, Vector, Prime, etc...)	16.9 %

Fuente: Elaboración propia con base en Torres I. "El sistema poscosecha y la alimentación nacional", en "El sistema poscosecha de granos en el nivel rural: problemática y propuestas", PUAL, México, 1995, pp. 199

Otra dificultad en México es la heterogeneidad de los sistemas de almacenamiento, los cuales varían acorde con los agroclimas regionales y los recursos. Pueden ser desde silos cónicos, bodega plana de cientos de toneladas de capacidad, hasta los del medio rural: trojeso bien estructuras improvisadas que generalmente no rebasan capacidades de 3 t.

A lo anterior se suma la dificultad de preservar productos de calidad heterogénea en un mismo almacén, cuando se reciben granos con diferentes daños, humedades, grados de infestación, lo que merma inevitablemente la calidad del conjunto.

Por otra parte, el sistema de transporte mexicano de granos sufre carencias en su disponibilidad y funcionamiento. Es un sistema complicado, mal planeado, en el que ocurre con frecuencia el llamado "turismo de granos" (las cosechas pueden llegar a recorrer grandes distancias sin objetivo fijo). Es insuficiente en capacidad por lo que provoca inmovilizaciones del grano de los campesinos, de los centros de acopio, de las bodegas y de los puertos, agudizándose este déficit al final de cada ciclo agrícola. Muchas veces es obsoleto, presentando problemas de carga y descarga, causando daños físicos al maíz; es lento y absorbe mucha mano de obra. Así, los costos generados directamente por el transporte se estiman en 10% y las mermas de un 10%. El costo del transporte aunado a su insuficiencia en capacidad originan la recurrencia al almacenamiento a la intemperie⁹.

Otro problema es la inaccesibilidad del transporte, dada la existencia de comunidades y municipios

enteros que por su ubicación geográfica sufren desabasto de alimentos y dependen de intermediarios a los que se les debe pagar mayor precio.

En el plano internacional, tampoco existe una red capaz de movilizar eficientemente los crecientes volúmenes de importación provenientes en su mayoría de los EU. Por lo que "a partir de unos cuantos puntos fronterizos (Nuevo Laredo, Piedras Negras, Cd. Juárez) así como de 4 o 5 puertos (Veracruz, Tuxpan, Manzanillo, Guaymas) se puede ejercer sobre México un gran control estratégico en materia de alimentos".

En síntesis, un sistema de transporte carente como el nuestro es sinónimo de incompetencia e improvisación.

1.3.4.- Pérdidas poscosecha, el problema central.

Estimaciones hechas por la FAO sobre las pérdidas poscosecha señalan que, en términos generales, se pierde un 5% de la cosecha mundial de granos antes de llegar al consumidor. Sin embargo, la magnitud de las mermas varía de país a país, dependiendo en gran medida de sus condiciones geográficas y tecnológicas. En algunos países de Asia, América Latina y África, las pérdidas son del orden del 30% de la cosecha anual.

En 1974, una encuesta realizada a nivel nacional estimó pérdidas del 30% por prácticas deficientes de almacenamiento, y en años recientes los programas ligados a la alimentación han estimado conservadoramente mermas del 10% de las cosechas a causa de deficiencias en las prácticas poscosecha, sin embargo siguen siendo del orden del 20-30% e incluso del 60% en zonas del trópico húmedo". ANDSA (Almacenes Nacionales de Depósito) sólo reporta un 2% de mermas en el volumen que maneja. Por su parte la FAO estima para México pérdidas de entre 10 y 25%.

Se puede hacer una breve estimación del peso económico que representan las pérdidas evaluadas para el maíz en México.

Si se estima una producción para 1996 de 17.4 millones de toneladas¹⁰ e importaciones de 3.6 millones de toneladas para satisfacer la demanda de unas 20 millones de toneladas¹¹, siendo optimistas, supóngase que del total (21 millones de toneladas) se pierda sólo el 10% equivalentes a 2.1 millones de toneladas. Si el precio que pagó Conasupo en 1996 por tonelada de maíz es de \$1,250¹², entonces se estarían perdiendo **2,600 MILLONES DE PESOS EN UN AÑO**, tan solo por carecer de un sistema eficiente de poscosecha..

"Las pérdidas agrícolas afectan, directa e indirectamente, a los diversos entes económicos y sociales que conforman la población"⁸. Sus efectos los resienten más quienes menos recursos tienen, particularmente los productores temporales del medio rural, y en menor grado la industria procesadora de alimentos. Los deméritos en cantidad y calidad afectan la competitividad de la producción, transformación y la comercialización de los granos básicos, situación especialmente grave, dadas las nuevas circunstancias de apertura de la agricultura mexicana y la recesión que hoy enfrenta la economía ante la devaluación monetaria.

Con el paso del tiempo sería lógico pensar que este problema se ha amortiguado, pero desde la década pasada se importan alrededor del 30% de las necesidades de consumo humano de granos y cereales, valor semejante al de las pérdidas, por lo que de eliminarse éstas se solucionaría parte del problema alimentario interno así como la dependencia externa. A esto se suma que no es raro que los granos de importación se acompañen de 5 a 10% de granos rotos, lo que aumenta la susceptibilidad al deterioro.

Las pérdidas poscosecha, cuyos montos ponen en riesgo la seguridad alimentaria de los países pobres, pueden solucionarse de manera relativamente sencilla, si existe la suficiente voluntad política en el gobierno para apoyar los avances técnicos y mejorar las grandes deficiencias en la infraestructura del manejo de granos.

La respuesta al problema tradicionalmente se ha dirigido al incremento de la producción aún si ocurren pérdidas o no, pero "es más rentable proteger lo cosechado que invertir en costosas infraestructuras para incrementar la producción agrícola"⁶. De todas formas el problema central que debe ser resuelto a lo largo de la cadena poscosecha, dado que en ella no se incluye la producción, es hallar soluciones

eficaces para eliminar o al menos reducir las pérdidas de producto, preservando hasta donde sea posible su calidad.

1.3.5.- El panorama actual

La desventaja competitiva de México es una realidad en la mayoría de nuestros más importantes productos agropecuarios. Esto obedece, en primer lugar, a la brecha tecnológica de México respecto a los países del norte, evidente en términos de cosecha/ha y productividad/trabajador, a nuestra inferior provisión de recursos naturales y a las diferencias en las políticas agropecuarias de fomento, caracterizado en EU y Canadá por la canalización de enormes apoyos y subsidios al sector primario.

La situación de las regiones de pequeños productores de maíz es desesperada debido a que estas se han visto inundadas de maíz proveniente del extranjero, el cual se vende a través de Conasupo. Esto ha provocado una disminución real de precios, con diferentes consecuencias: la pérdida de maíces criollos por la caída de la actividad agrícola; y en el mismo sentido, pérdidas de superficie destinadas a la agricultura debido a la erosión de los suelos ante el abandono de labores culturales que mínimamente sostienen su fertilidad y humedad.

"Competir es saludable para incentivar una agricultura" es el lema neoliberalista en apoyo al TLC, pero los campesinos pobres no tienen ninguna posibilidad de competencia ante la apertura comercial del maíz, si lo que tienen en común entre ellos es la profunda miseria de vida y la falta de perspectiva de cambio, y como agricultores (su capacidad de producción es de 800 kg/ha frente a 8-9 mil de otras partes), y ni siquiera les sería atractivo cultivar para el autoconsumo ya que sale más barato comprar el maíz.

Frente a la desventaja competitiva del sistema agrícola mexicano actual, no es difícil predecir la inminente crisis en que se sumirá, y por lo tanto nuestra creciente dependencia del extranjero (Estados Unidos) en materia de suministro de granos básicos. El propósito de este trabajo no consiste en analizar ni mucho menos atacar la muy criticable política agrícola de México, sino tener presente que el país se encuentra ante una situación que debemos considerar como un llamado a definir las carencias y

necesidades del sistema poscosecha de granos así como a proponer soluciones tecnológicas propias enfocadas a las situaciones particulares que nos afectan.

I.4.- NECESIDADES Y PROPUESTAS

México se encuentra frente a una evidente y agravante crisis agrícola que no promete mejorar en los años venideros, salvo que en la organización del campo se tome una importante iniciativa de cambio, ya que sus actuales esquemas, lejos de ser eficientes o adecuados a la problemática del campo, son hasta opuestos a lo que cualquier país debería aspirar: el caso ideal.

1.4.1.- La organización ideal

Idealmente, las funciones del sector agropecuario son las siguientes :

- proveer los alimentos y materias primas que el país demande, apoyando así a la estabilidad económica
- generar excedentes exportables
- preservar el mayor volumen posible de empleos rurales, lo que aligeraría las presiones sobre el mercado de trabajo urbano, dada la imposibilidad de la economía mexicana de absorber en otras actividades a las 5 millones de familias campesinas.

Pero para tal funcionamiento es necesario pensar en un fomento agropecuario incluyente de los campesinos y que comprenda puntos esenciales como:

- impulsar una política de precios de garantía, lo que ofrecería a productores solvencia crediticia y recursos para la tecnificación de sus granjas (es decir lo contrario a la tendencia actual).
- canalizar inversiones públicas para obras de infraestructura.
- ofrecer crédito rural con tasas preferenciales para los pequeños cultivadores de productos masivos prioritarios (justamente lo contrario de lo que sucedió con las carteras vencidas a causa del deterioro de la rentabilidad del campo consecuencia de la apertura comercial).
- Apoyo a la investigación agronómica y zootécnica *in situ*.

Estas acciones obedecerían a la necesidad de recuperar y mantener la producción de nuestros más importantes alimentos, preservando los empleos agrícolas y elevando los ingresos rurales, así como abaratar progresivamente los costos de producción mediante el desarrollo técnico.

Sin esperar que en el campo mexicano se establezca una estructura como la mencionada anteriormente, es necesario proponer y realizar acciones dirigidas al apoyo real de la agricultura, en especial en favor de los más necesitados, es decir los campesinos, antes de que el libre mercado los convierta en un recuerdo.

1.4.2.- Algunas propuestas

En una economía tan frágil como la de los campesinos, resulta vital el diseño de políticas adecuadas que, respetando la organización de las familias indígenas y campesinas, transfieran tecnologías que permitan almacenar y conservar los granos por más tiempo, al buscar alternativas para comercializar en mejores condiciones los reducidos excedentes. Pero no se observará un avance real mientras no se logre un consenso real entre campesinos y gobierno.

"La superación de la pobreza, el mejoramiento productivo, el desarrollo tecnológico y la participación campesina requerirán reformas institucionales sustantivas e indispensables si se pretende transitar hacia un desarrollo sustentable. En este sentido, los rumbos que ha tomado el país dan señales contradictorias en cuanto a la política social y la económica"¹³.

Una alternativa es "apoyar la producción y el manejo en forma colectiva para optimizar el uso de los recursos económicos, tecnológicos, y el establecimiento de pequeñas industrias que transformen el maíz en productos con valor agregado, como la harina de maíz"³.

Es necesario iniciar otras acciones en materia de secado de granos, diseño y fabricación de contenedores modulares ligeros y transportables para sustituir la costalera del maíz y para el almacenamiento semi-doméstico y comunitario del grano.

Se necesita el apoyo a tecnologías de fácil acceso para los diversos tipos de productores dependiendo de su capacidad de producción y su modo de participación en el mercado. Aunque la sustitución rápida.

sin un periodo adecuado de transición, de técnicas modernas incompatibles con las condiciones locales por los menos tradicionales, probablemente empeorará los problemas más que resolverlos¹⁴.

Se debe aspirar también a la autosuficiencia regional sustentada en el apoyo a los campesinos, así se reducirían las necesidades y costos de transporte, aumentándose la disponibilidad regional, y esto resultaría atractivo para el establecimiento de industrias.

Asimismo, "la transferencia de la tecnología disponible para maíz a las mejores tierras tradicionalmente maiceras del país, tanto de riego como de temporal, podría añadir más de 4.5 millones de toneladas anuales a la producción nacional del alimento básico por excelencia"¹⁵, tal cantidad es similar al volumen de importaciones anuales del grano, por lo que se podría aspirar a recuperar y sostener la autosuficiencia de maíz a plazo relativamente corto.

Una vez estudiada la problemática agrícola mexicana, se pueden resaltar algunas observaciones importantes: la soberanía alimentaria debe ser una prioridad nacional, aun cuando en el reciente esquema del libre mercado se pretenda disfrazar nuestra creciente dependencia del extranjero en materia alimentaria con la gradual industrialización y la conversión de México en país maquilador de firmas extranjeras.

Conscientes de que es muy necesario una reevaluación de las estrategias políticas y económicas, y de que finalmente la última palabra siempre la tiene un político, creemos necesario aportar herramientas tecnológicas para el cambio. En este sentido, identificamos un problema fundamental de nuestra agricultura: el deficiente sistema poseosecha en todas sus fases. Además debemos concentrar las nuevas ideas en favor de la población que todavía sustenta penosamente al campo: los campesinos, los pequeños y medianos productores. Aún cuando ellos deben ser los primeros en ser atendidos, este trabajo expone una alternativa para el adecuado almacén de granos, que puede ser utilizada por cualquier tipo de productor, ya sea pequeño o grande. Así, la segunda parte de este trabajo expone primero una descripción y análisis de las fases del sistema poseosecha y finalmente una evaluación del silo solar hexagonal, como una propuesta para resolver algunos de los problemas más importantes de dicho sistema.

CAPÍTULO II

EL MAÍZ, CEREAL DE IMPORTANCIA MUNDIAL

Los granos son considerados en todo el mundo como el más importante de los alimentos para el hombre, y también para los animales. Es entonces vital el producirlos, preservarlos y distribuirlos óptimamente. Se incluye entre los granos a los cereales (maíz, trigo, arroz, sorgo, etc.), las leguminosas (frijol, habas, chícharos, etc.) y las semillas oleaginosas (soya, canola, girasol, etc.). Su importancia alimenticia reside en su alto contenido de almidón, y por lo tanto energético, así como en su no menos valioso contenido de proteína y aceite. Comparados con otros alimentos, los granos son únicos gracias a su durabilidad durante su transporte y su capacidad de mantener su calidad por períodos largos si son debidamente cosechados y almacenados, pero estas operaciones insospechadamente complejas y difíciles de realizar.

El maíz, el trigo y el arroz, cereales los tres, son los granos de mayor importancia actualmente. Los cereales han sido y siguen siendo la principal fuente alimenticia del hombre. La preponderancia de estos alimentos en las fuentes alimenticias mundiales, como se ve en el cuadro 2.1, es impresionante.

Cuadro 2.1.- Producción anual mundial aproximada de los principales alimentos primarios, expresada en peso de materia seca.

Producto	millones de toneladas / año
Todos los cereales	1,300
Papas y tubérculos	80
Otras frutas y vegetales	50
Otras semillas y frutas secas	30
Carnes	25
Leches	20
Pescados y mariscos	15

Fuente: Multon J.L. 1988. *Preservation and storage of grains, seeds and their by-products*. Lavoisier Publishing Inc., NY USA, pp 3.

La palabra cereal deriva del nombre de la diosa romana del grano o de la cosecha, *Ceres*. Los cereales son las semillas de los pastos. Las plantas de las que provienen los cereales son el trigo, arroz, maíz, etc. Existe una inmensa variedad de materias primas y productos que se pueden obtener de ellos (harinas, almidones, jarabes, pan, pastas, alimentos para el desayuno, etc.).

Para el consumo humano, el trigo es el principal cereal en Europa Occidental, los Estados Unidos y Canadá; el arroz, el principal en China, Japón y la India; el centeno, el principal en Rusia y en Europa Central. El maíz se consume mayoritariamente en México, Sudamérica y los Estados Unidos. No sólo los principales cereales consumidos varían de un país a otro, sino también la importancia de los cereales como parte de la dieta, por ejemplo la proporción total de calorías que proviene de los cereales es baja en los Estados Unidos (21%), mientras que en países del lejano oriente puede ser hasta del 64%. Esto es obvio si se comparan las características económicas y culturales de cada país.

Los cereales proporcionan casi la mitad (47%) de las proteínas de la dieta en todo el mundo y podría ser aún mayor. El consumo de los cereales representa directamente un uso más eficiente de la tierra arable, la energía latente y la mano de obra. Cada hectárea de maíz plantada en los Estados Unidos proporcionará suficiente proteína utilizable para alimentar a 12 personas con 60 g. de proteínas al día durante un año. Para el arroz, el número es de 10 y para el trigo de 8. En realidad, los cereales no se comparan con los alimentos de origen animal en cantidad ni en calidad de las proteínas. Los cereales son esencialmente deficientes en el aminoácido indispensable lisina. Aun así, la producción de proteínas y aminoácidos indispensables por Ha de tierra cultivada es varias veces mayor en el caso del maíz cuando la semilla se utiliza directamente como alimento que cuando se consumen animales que han comido la misma cantidad de maíz.

Como fuentes de hidratos de carbono, en relación con la utilización del suelo, el maíz, con una producción de 837 kJ/ha, se clasifica el primero entre los granos de cereal, seguido por el arroz con 737 kJ/ha, el sorgo con 477 kJ/ha, y el trigo con 460 kJ/ha.

El maíz constituyó la dieta fundamental de las antiguas civilizaciones de los indios de América (Aztecas, Mayas, Incas, etc.) y hoy día sigue siendo parte esencial de la dieta en los países

hispanoamericanos y algunas partes de África. El maíz se utiliza para la alimentación humana o animal, y sirve como materia prima de diversos productos como harinas, almidón, jarabe, azúcar, cerveza, alcohol industrial, etc. En los países industrializados se utiliza en más del 50% para alimentación animal y también en alto porcentaje se destina al uso industrial de transformación, principalmente a harina.

2.1.- CONSUMO DE MAÍZ EN MÉXICO

Se puede apreciar la repartición del consumo del maíz en México en el cuadro 2.1.1, siendo evidente su importancia en nuestra dieta.

Cuadro 2.1.1.- Repartición del consumo del maíz en México:

Uso	Cantidad destinada (millones de ton)	Porcentaje
Consumo humano	11	46%
Forraje	10	42%
Mermas	1.5	6.3%
Usos industriales	1.0	4.2%
Semilla	0.25	1.0%
TOTAL	23.75	100%

Fuente: Elaboración propia con base en Iturriaga J.N., *La comercialización de granos básicos: maíz y frijol*, en *El sistema poscosecha de granos en el nivel rural: problemática y propuestas*, PUAL, 1995, México, pp 178.

Algunos autores estiman el consumo de maíz anual en casi 24 millones de toneladas, mientras que el consumo nacional aparente (suma de la producción nacional y las importaciones menos las exportaciones) sólo alcanzó 17.8 millones de toneladas en 1994. Pero la producción nacional según Conasupo¹⁶ en 1995 sólo fue de unas 15 millones de toneladas anuales.

Considerando la magnitud de la producción de cereales es fácil apreciar que el entendimiento de los fenómenos involucrados en el almacenamiento de granos y semillas, y el dominio de las técnicas de

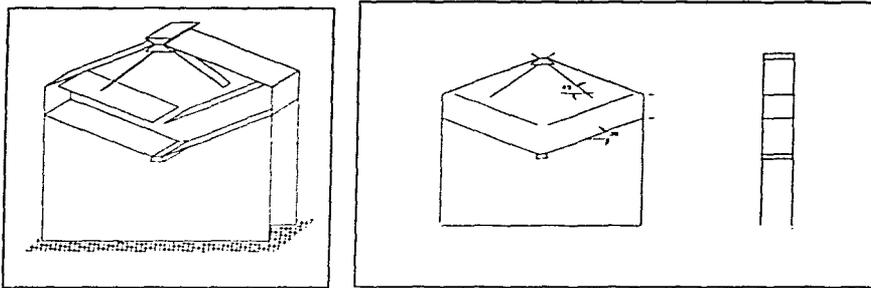
almacenamiento son claves para la alimentación de millones de personas. Es por esto también que el almacén y administración de los stocks de granos ocupan un lugar crucial en el mundo político, y claro, aquellos que manipulan los granos poseen enorme poder.

2.2.- UN NUEVO TIPO DE SILO

Dejando a un lado la producción e industrialización del maíz, que no son problemas resueltos en México, el presente trabajo se enfocará al estudio de una nueva propuesta en sistemas de almacenamiento de las cosechas, principalmente maíz. Hemos visto que la poscosecha del maíz sufre enormes deficiencias, y es una necesidad urgente buscar soluciones tecnológicas adecuables a la situación particular de nuestro país. El silo solar hexagonal es una opción pensada en resolver diversos problemas directamente relacionados con el acondicionamiento y conservación de granos.

Uno de los problemas es el diseño y construcción de silos, tema que se discutirá brevemente. A pesar de que existe un gran número de silos con formas geoméricamente diversas, la mayor parte son de tipo vertical. Este tipo de geometría acarrea problemas tales como la aparición de esfuerzos dinámicos "secundarios" durante el vaciado, la distribución no uniforme de esfuerzos en las paredes, destrucción del grano debido a la fricción, compactación irregular de los materiales dentro del silo en el proceso de llenado, y la dificultad en el diseño de la tobera de descarga, sólo por nombrar algunos. En el silo hexagonal los granos fluyen al interior del silo a través del alimentador, el cual distribuye el flujo en dos canales simétricos, ambos a 45° con respecto a la horizontal (ver figura 2.2.1).

Figura 2.2.1.- Perspectiva simple del silo hexagonal.



La sección transversal hexagonal está dividida en dos secciones interiores, por medio de dos placas transversales. La inclinación de las paredes del fondo del silo y las placas es de 30° con respecto a la horizontal, ya que este ángulo es ligeramente superior a los ángulos de reposo de los granos más comúnmente almacenados en silos.

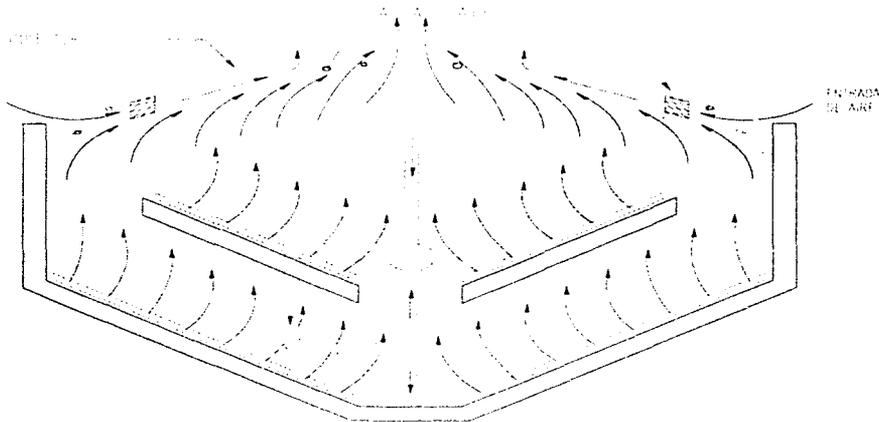
Esta inclinación tiene como propósito reducir los esfuerzos dinámicos responsables de las fracturas en las paredes del silo, además de obtener un flujo homogéneo y de baja fricción, y tratar de eliminar la compactación y formación de polvo, evitándose de esta manera daños al material. En el llenado, el grano se acomoda de manera natural y sin compactarse demasiado, lo cual es completamente deseable. Además se evita el riesgo de explosión a causa de la formación de tamo (maíz pulverizado), accidente común en silos convencionales.

Esta geometría pretende modificar la idea general de construcción de silos, basándose en algunas consideraciones reológicas simples. La estructura, formada por una o varias celdas del tipo antes descrito, se encuentra soportada por medio de paredes laterales. La altura de la estructura es tal, que permite el paso de transportes terrestres por la parte inferior para recibir los granos durante el vaciado.

Además, el costo total de un silo hexagonal de gran capacidad, es considerablemente menor que el de un silo vertical de similar capacidad. Esto es debido, en gran parte, al sistema de construcción a base de losas de concreto, el cual permite abatir costos de construcción considerablemente.

El principal problema que pretende remediar el silo solar hexagonal es la conservación de los granos cosechados, para lo cual el silo está dotado de un sistema de secado solar y de aireación. Gracias a dicho sistema y a su estructura, el silo protege al producto de todas las causas de deterioro, que son en términos breves la intemperie y las plagas. El proyecto, está orientado a la obtención de una estructura con tendencia bioclimática, que por su diseño mantenga a muy bajo costo energético las condiciones adecuadas del microclima interior del silo para la excelente conservación del grano (ver figura 2.2.2).

Figura 2.2.2.- Sistema de secado y aireación.



Por otro lado, el nuevo sistema de almacenamiento de granos mediante energía solar, abate los costos de maquinaria de secado y aireación de grano; no utiliza combustible alguno, no perjudica la ecología del ambiente, permite un control absoluto de la calidad del grano almacenado y no requiere mantenimiento.

CAPÍTULO III

CALIDAD DE LOS GRANOS, FACTORES QUE LA AFECTAN

Son diferentes los atributos que determinan la calidad de los productos agrícolas. Refiriéndose a los granos, la norma especifica las características que la determinan: humedad, materia extraña, grado de infestación, propiedades sensoriales, etc., aunque se omiten aspectos como la calidad nutricional. La norma del maíz se publicó en el Diario Oficial, segunda sección, el día miércoles 3 de febrero de 1982, con clasificación NOM- FF-34-1982 (ver anexo I).

Bajo las mismas condiciones de almacenamiento, los granos y las semillas pueden tener calidades diferentes, que dependen de variables ocurridas en etapas anteriores. Así, no se espera que un lote de semillas de calidad mediana se comporte igual que un lote de semillas de alta calidad. Como la calidad en el almacén no se puede mejorar, granos de mala calidad por bien que se guarden seguirán teniendo mala calidad. La calidad de los granos depende de los siguientes factores:

- condiciones climáticas durante el periodo de maduración de la semilla en el campo.
- grado de maduración en el momento de la cosecha
- temperatura
- impurezas
- humedad
- daños mecánicos
- microorganismos
- insectos
- roedores

Condiciones climáticas durante la maduración de la semilla

En la primera de las dos etapas de maduración de la semilla, esta acumula rápidamente materia seca en el campo, antes de ser cosechada; en esta etapa es indispensable la presencia de humedad en el suelo en cantidades adecuadas. Un período de sequía traería como consecuencia una semilla más liviana, es decir, con menor contenido de materia seca y, por lo tanto, serían menos vigorosas y tendrían menos potencial para el almacenamiento. La segunda etapa, en que la semilla se muestra particularmente sensible, se presenta cuando alcanza su máximo contenido de materia seca; en este caso la semilla se deshidrata rápidamente para entrar en equilibrio con la humedad relativa del aire. Si durante esta etapa llueve mucho, la deshidratación será lenta y el contenido de humedad permanecerá elevado por un período mayor, lo que propicia un rápido deterioro¹⁷.

Grado de maduración en el momento de la cosecha

Las semillas recolectadas antes o después del punto de madurez fisiológica son semillas con menor potencial de almacenamiento, ya sea porque no han alcanzado su máximo vigor o porque ya se inició el proceso de deterioración.

Temperatura

La temperatura, como la humedad, determinará la susceptibilidad de los granos a deteriorarse. Tal y como sucede con todos los alimentos, las bajas temperaturas favorecen la conservación de los granos, inhibiendo su metabolismo y así reduciendo la liberación de agua y calor, efecto que se observa mejor en alimentos de alto contenido de humedad. La temperatura determina también la actividad de las plagas, como los insectos, los cuales reducen su actividad a menos de 18°C y son inactivados a menos de 10°C, o los hongos que aunque pueden crecer a temperaturas de 0 a 45°C, pueden controlarse a temperaturas menores de 15°C. Así, las bajas temperaturas pueden compensar los efectos de un alto contenido de humedad y evitar el desarrollo de microorganismos, insectos y ácaros. En cambio temperaturas elevadas (más de 25°C) prácticamente garantizan el deterioro biológico del producto¹⁷.

Impurezas

Las impurezas son en general fragmentos provenientes de la propia planta, como hojas, trozos de granos, ramas, pajas, etc. asimismo, existen otras impurezas que no provienen de la propia planta, a las cuales se les denomina materia extraña, como semillas silvestres, parte de otras plantas, terrones, tierra, piedras, etc. Aunque su presencia puede reducirse controlando los métodos de cosecha, es casi imposible obtener un producto perfectamente libre de impurezas.

Los granos que contienen impurezas y materias extrañas son portadores de una mayor cantidad de microorganismos y presentan condiciones que facilitan su deterioro. Esto se debe en gran medida a que las materias extrañas e impurezas, bajo las mismas condiciones de humedad relativa y temperatura del aire, presentan contenidos de humedad más altos que el producto¹⁷.

La acumulación de impurezas y materias extrañas en determinadas zonas de un silo vertical o de un granero forma una masa compacta y húmeda que dificulta las operaciones de secado, aireación y fumigación. En general, los granos almacenados presentan un espacio vacío del 40 al 50 por ciento del volumen que ocupan¹⁸. Si la masa de los granos contiene un alto porcentaje de polvo, fragmentos de producto y cuerpos extraños, éstos ocuparán los espacios vacíos, lo que dificultará las diferentes operaciones. El espacio intergranular, también conocido como porosidad, deberá estar exento de impurezas y materias extrañas, con la finalidad de que presente condiciones óptimas para el paso de aire caliente (secado), del aire frío (aireación) y de los fumigantes.

Desde el punto de vista comercial, el contenido de granos quebrados y materia extraña es importante, ya que cuando el producto está sucio es clasificado como de menor calidad y sufre una considerable reducción de precio, según las normas lo establezcan.

3.1.- HUMEDAD DE LOS GRANOS

La humedad es el factor más importante en la conservación de los granos, tanto en el aire (humedad relativa, HR) como en el grano (contenido de humedad) ya que la disponibilidad de agua es determinante en el desarrollo de insectos y hongos, principales agentes biológicos de deterioro de los granos.

Debe conocerse la humedad en el almacenamiento, a la entrada y durante el mismo para poder tomar las medidas y prevenciones necesarias en su conservación.

La humedad también es un dato importante en comercialización, y casi siempre es motivo de castigo en el precio de compra de granos, mientras que raramente se bonifica por ser el producto de humedad baja y adecuada, según la norma de cada país.

Si bien hay otros factores que pueden ejercer influencia sobre la conservación de los granos, su calidad global gira en torno a la humedad del grano, pues de ella dependen en gran medida la mayoría de los demás atributos (vida de anaquel, susceptibilidad a infestación por hongos, susceptibilidad a sufrir daños mecánicos, calidad comercial, etc.). La humedad de los granos (peso de agua libre por peso de producto expresado en porcentaje) influencia los procesos de colecta, almacenamiento, germinación, etc., y su alteración normalmente resulta perjudicial. Aunque al momento de la colecta el grano se encuentra relativamente seco, el producto debe sufrir un secado complementario para garantizar la seguridad y eficiencia de su almacenamiento, de ahí que del secado de los granos dependerá en gran medida su calidad.

El contenido de agua de los granos representa dinero: altas humedades significarían dificultades para el manejo y secado por lo que deprecian el grano. Los granos contienen agua en estado líquido, en contacto directo con la estructura celular y se evapora con facilidad en presencia de calor, se trata del agua libre. Otra porción de agua, el agua de constitución se encuentra químicamente presa al material. Durante el secado la mayor parte del agua que se remueve es agua libre¹⁰. La humedad se expresa como

cantidad de agua libre en porcentaje. Se puede expresar en base húmeda, usado comercialmente o en base seca, que se usa más en la investigación:

$$\% \text{ humedad}_{b.s.} = \frac{\text{peso de agua}}{\text{peso de materia seca}} \times 100$$

$$\% \text{ humedad}_{b.h.} = \frac{\text{peso de agua}}{\text{peso total}} \times 100$$

Las dos formas de expresar la humedad de los granos se relacionan entre sí:

$$\% \text{ humedad}_{b.h.} = \frac{\% \text{ humedad}_{b.s.}}{\% \text{ humedad}_{b.s.} + 100}$$

La humedad también suele expresarse en forma decimal en vez de en porcentaje y en cualquier caso es un valor adimensional.

3.1.1.- Humedad de equilibrio

La afinidad de los granos y el agua es comúnmente denominada higroscopicidad, los granos de las diversas especies de cereales, oleaginosas y otros son de naturaleza higroscópica; es decir su contenido de humedad varía de acuerdo a las condiciones de temperatura y humedad relativa del aire ambiente donde se encuentran¹⁷.

El concepto de humedad de equilibrio es útil para saber si en ciertas condiciones de temperatura y humedad relativa del aire el producto ganará o perderá humedad. Cuando la razón de pérdida de humedad es igual a la razón de aumento de humedad, se dice que el producto está en equilibrio con el ambiente. Cuando la humedad del producto está en equilibrio con la del ambiente, se dice que contiene la humedad de equilibrio, o equilibrio higroscópico. Para una dada temperatura, existe una humedad relativa de equilibrio. La relación entre la humedad del producto y la humedad relativa de equilibrio a una temperatura dada se representa en forma de isothermas de equilibrio, que son descritas por una variedad de ecuaciones propuestas por diferentes autores. Algunas isothermas representan mejor que

otras el comportamiento real, según el alimento del cual se trate. Para los granos, que son alimentos de baja humedad, las ecuaciones modificada de Henderson y de Chung son las más precisas¹⁸.

Ecuación modificada de Henderson:

$$1 - \frac{P_v}{P_{vs}} = \exp(-K(T + C)(100M)^N)$$

Ecuación de Chung:

$$M = E - F \ln \left(-(T + C) \ln \left(\frac{P_v}{P_{vs}} \right) \right)$$

donde $\frac{P_v}{P_{vs}} = \frac{\%HR}{100}$

P_v : presión de vapor del agua en el aire en N/m^2

P_{vs} : presión de vapor del agua en el aire saturado (o presión de vapor saturado) en N/m^2

T : temperatura en $^{\circ}C$

M : contenido de humedad, base seca, decimal.

K, N, C, E y F : constantes que dependen del tipo de grano y de la ecuación (valores en la pag. 116).

3.1.2.- Actividad del agua

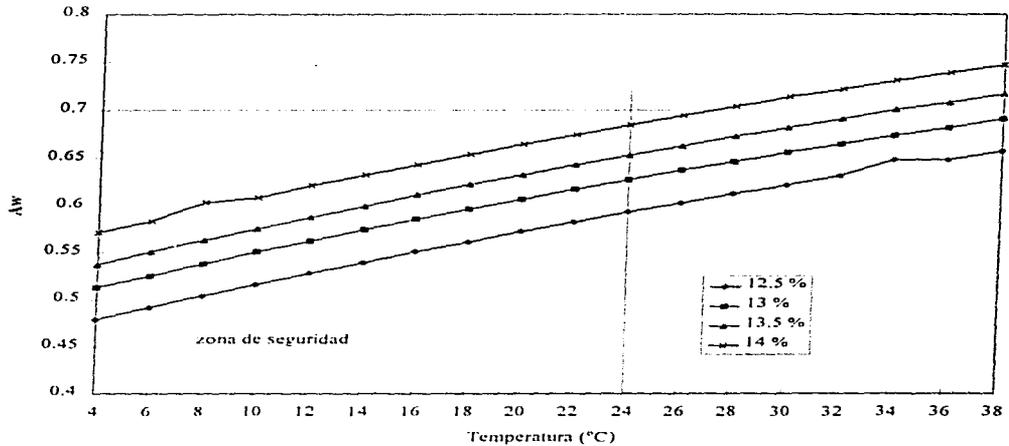
El concepto de actividad de agua (A_w) está relacionado con su potencial químico; la actividad de agua es, en la práctica, igual a la humedad relativa del aire de equilibrio expresada en decimal:

$$A_w = \frac{\% HReq}{100}$$

La actividad del agua es un indicador de la disponibilidad de este elemento para la actividad biológica del grano y de los microorganismos que lo atacan. Para considerar la estabilidad de un producto almacenado y sus riesgos de deterioro, se debe analizar la actividad del agua en conjunto con la temperatura. Este análisis proporciona mayor información práctica que sólo analizar el contenido de humedad.

Las reacciones químicas y bioquímicas requieren un mínimo de "agua libre" para poder comenzar, así su velocidad aumenta en función de la cantidad de "agua libre" disponible²⁰. En la gráfica 3.1.1 se presentan datos de la actividad del agua en maíz para temperaturas de 4°C a 38°C, y los contenidos de humedad en que los productos son comúnmente almacenados en América Latina.

Gráfica 3.1.1.- Aw vs. Temperatura (maíz) a diferentes humedades (% b.h.)



Fuente: Arias Ciro. 1993. *Manual de manejo poscosecha de granos a nivel rural*. Oficina Regional de la FAO para América Latina y el Caribe. Santiago, Chile.

La actividad del agua del maíz por debajo de 0.65, prácticamente elimina el riesgo de crecimiento de hongos; en consecuencia se evita su deterioro. Los granos con contenido de humedad y temperatura que corresponden a la actividad del agua entre 0.65 y 0.70 pueden ser almacenados por un período de tiempo corto (algunos meses). La actividad de los hongos, con esa disponibilidad de agua, es lenta; por ejemplo, si hubiese un foco de insectos, la elevación de la temperatura debida a la respiración de los mismos podría ocasionar un aumento de la velocidad de crecimiento de los hongos y el crecimiento del

producto. Los granos con contenido de humedad y temperatura que corresponde a la actividad del agua superior a 0.70 no están en condiciones aptas para el almacenamiento, puesto que la disponibilidad de agua es elevada. En efecto, la actividad biológica de los granos y de los microorganismos será más rápida¹⁷. El análisis de la actividad del agua es el factor más importante para establecer los contenidos de humedad recomendados para el almacenamiento seguro de los granos.

La temperatura y el contenido de humedad del grano definen la actividad de agua contenida en el producto almacenado. La temperatura y la humedad relativa del aire del espacio intergranular siempre tenderá a estar en equilibrio con las condiciones del grano. Pueden ocurrir cambios en las condiciones del aire del espacio intergranular, provocadas por las condiciones del ambiente externo a la masa de los granos, pero la mayoría de las veces estos cambios son lentos; sin embargo, sus consecuencias pueden ocasionar pérdidas por deterioro.

3.2.- INDICADORES DE CALIDAD COMERCIAL

Para fines comerciales, los granos son clasificados de acuerdo a su contenido de humedad, peso hectolitro, por ciento de granos quebrados o dañados y por ciento de materia extraña¹⁹.

Densidad: el peso hectolitro (densidad granular) se altera durante el secado, dependiendo de la humedad inicial y final del producto. Normalmente, a menor humedad del producto, mayor será su peso hectolitro. Un secamiento excesivo o temperaturas muy elevadas reducirá el peso hectolitro.

Daño físico: la fuente más importante de daño físico del grano es el secado excesivo, aunque por el manejo del grano puede ocurrir a lo largo de la cadena poscosecha, produciéndose fisuras y fragmentación del grano durante su manejo. Una semilla se puede dañar mecánicamente bajo las siguientes circunstancias:

- En la cosechadora, en el momento del desgranado.
- Durante el llenado de centros de acopio y almacenes, ocurriendo el daño durante las sucesivas caídas de los granos desde diversas alturas.
- Durante el almacenamiento, a granel o en sacos, cuando los granos quedan debajo de una pila de sacos o de un montón a granel y tienden a quebrarse por el peso que soportan.
- Durante el transporte, el daño se produce como consecuencia de la falta de una buena supervisión durante la carga y descarga, sobre todo de camiones y vagones. Los obreros que realizan esta labor debieran estar conscientes de la importancia que tiene el no dañar las semillas y tratar los granos envasados o a granel con el debido cuidado.

Dichos daños se reflejarán en susceptibilidad al ataque de hongos (estos granos se deterioran con facilidad y se convierten en focos que afectan a los granos sanos), menor viabilidad, incremento en la cantidad de grano quebrado y grano con fisuras, incremento de partículas provenientes de dicho daño (por ejemplo el tamo que es explosivo). Los granos quebrados se pueden eliminar por tamización, pero generalmente no se hace. Su determinación es importante para predecir el tiempo y condiciones de almacenamiento y manejo.

Quebrados: granos secados inadecuadamente tienden a quebrarse durante el transporte. Durante el secado, los granos pueden sufrir rajaduras en su interior o rupturas en sus capas más externas. Esto puede ser causado por la temperatura del aire de secado, pero otros factores intervienen como la humedad inicial del grano, el sistema de secado utilizado y la tasa de enfriamiento. En general la susceptibilidad a quebrarse disminuye si su humedad inicial es más baja, y aumenta si la temperatura de secado es elevada. La humedad relativa del aire también influye. Se han hecho intentos para cuantificar la susceptibilidad de los granos a quebrarse con aparatos que someten muestras a esfuerzos mecánicos o condiciones de impacto, como el "Stein Breakage Tester".

Otro factor de interés comercial que además tiene implicaciones en la salud es la calidad sanitaria. Junto con la humedad, con la cual se relaciona directamente, este es el factor que más preocupa a los dedicados a la cosecha de los granos. Mantener la seguridad del alimento es una meta prioritaria pero muy difícil de cumplir, pues los granos son invariablemente afectados por todo tipo de organismos

vivos, mermando la calidad y en algunos casos volviendo al producto peligroso para el consumidor (humano o animal) como es el caso de hongos productores de ciertas micotoxinas.

Plagas de los granos:

Una de las causas más importantes del deterioro de los granos son los agentes biológicos, principalmente microorganismos (hongos), insectos y vertebrados (roedores y pájaros). El daño que generan es obviamente resultado de malas condiciones del sistema de almacenamiento ya sea porque la misma estructura es inadecuada y permite el acceso de plagas y/o porque no existe control ambiental en su interior, permitiéndose así la proliferación de los organismos que llegan a infestar al grano. La acción de estos agentes resulta en el demérito de la calidad comercial (p.ej. pérdida de peso), nutritiva (p.ej. pérdida o degradación de nutrientes), sensorial (p.ej. olores y sabores de fermentación), sanitaria (p.ej. producción de micotoxinas) etc. del producto.

Durante la colecta, los impactos mecánicos que puede sufrir el grano pueden resultar en rajaduras o cuarteaduras que sirven de entrada a los hongos e insectos..

Los agentes que dañan la calidad y/o disminuyen el peso de los productos almacenados son los roedores, insectos, pájaros, hongos y la migración de humedad, aunque la respiración también contribuye, en menor escala, a la pérdida de materia seca.

Los ataques a los granos de insectos, roedores, y notablemente de hongos causan pérdida de peso del producto, fermentación, rancidez de los lípidos y otros procesos que alteran las cualidades organolépticas del producto. En la actualidad, al existir técnicas modernas y eficientes para combatir insectos, roedores y pájaros, los hongos figuran como los principales causantes de daños en los granos, tanto en el campo como en el almacenamiento.

3.3.- MICROFLORA DE LOS GRANOS ALMACENADOS

La microflora de los granos almacenados está constituida por una gran variedad de microorganismos, siendo los hongos los principales. La disponibilidad de agua y la temperatura son los principales factores que influyen en el crecimiento de los hongos en granos almacenados, por lo que se recurre a estos factores para prevenir su desarrollo. Sin duda, los agentes fundamentales de deterioro de los granos son los hongos y por lo tanto constituyen una importante causa de pérdidas. El crecimiento de bacterias y levaduras sólo se da bajo condiciones de elevada disponibilidad de agua, arriba de 0.85; por ejemplo para el maíz, con temperaturas de 20°C a 30°C esto corresponde a contenidos de humedad mayores de 17% b.h.³. Afortunadamente no se almacenan granos bajo esas condiciones.

Los hongos que merman la calidad de los granos pueden dividirse en dos grupos: los de campo y los de almacén¹⁹.

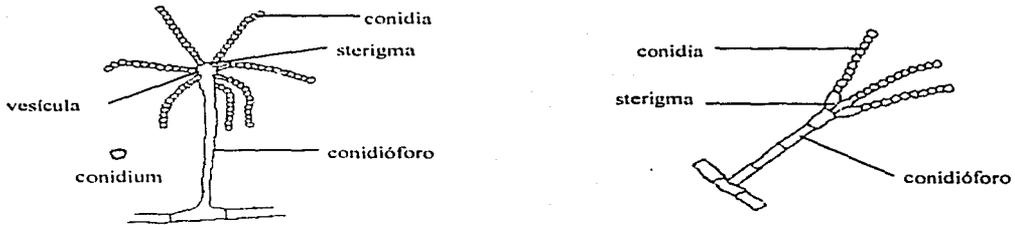
Hongos de campo:

Atacan semillas o granos antes de la colecta, durante su desarrollo en la planta. Requieren para crecer una humedad relativa de 90-95%, o de un contenido de humedad de 25% b.h.. Su desarrollo se evita a bajas humedades y temperaturas (12% contenido de humedad, 75% HR y 10°C). Los hongos de campo pueden provocar pérdida de la coloración natural y del brillo de los granos, con lo que se reduce el valor comercial del producto. En las semillas, además de reducir el poder germinativo y el vigor, pueden ocasionar putrefacción de las raíces y otras enfermedades de las plantas.

Hongos de almacenamiento:

Son aquellos que se desarrollan después de la cosecha, a humedades relativas de 60-90%, principalmente del género *Aspergillus* y *Penicillium* (figura 3.3.1), los cuales se adaptan a medios con bajo contenido de humedad (<25%b.h.).

Figura 3.3. 1.- Aspecto al microscopio de *Aspergillus* (izquierda) y *Penicillium* (derecha)



En silos y bodegas, los daños causados por los hongos de almacenamiento son mayores que los producidos por los hongos de campo.

Causas del desarrollo de hongos:

Las condiciones que alteran su desarrollo son la humedad, temperatura, grado de contaminación, impureza de los granos, tiempo de almacenamiento, ataque de insectos, tasa de oxígeno en la atmósfera de almacenamiento, daños físicos durante la colecta.

El factor solo más importante para el desarrollo de hongos es una alta humedad, no del producto, pero sí de la humedad relativa de equilibrio del aire intersticial. Temperaturas elevadas favorecen su crecimiento (10-35°C). El desarrollo de los hongos se reduce a humedades relativas por debajo del 70% o cuando la temperatura es menor a 10°C.

Los hongos requieren para su desarrollo una humedad relativa mayor al 75% ($A_w > 0.75$) y un contenido de humedad mayor al 13%³. Las especies más conocidas e involucradas en el ataque de maíz son *Aspergillus glaucus* y *Aspergillus flavus*²¹. Como los hongos pueden incluso crecer en forma exponencial con sólo un incremento de 0.2% de humedad, debe tenerse siempre un control estricto de ella, sabiendo que la humedad no es uniforme ni dentro del grano ni entre los granos y en su determinación siempre se obtienen promedios²².

El cuadro 3.3.1 muestra los principales hongos de los granos almacenados, junto con la actividad de agua mínima para su crecimiento a una temperatura de 26°C. Es clara entonces la necesidad de establecer el contenido de humedad más apropiado para el almacenamiento seguro de los granos. El contenido de humedad para un almacenamiento prolongado, sin que se produzca desarrollo de hongos, es aquél en que la actividad de agua del grano es menor de 0.65 para las temperaturas que son comunes para el almacenamiento de granos.

Cuadro 3.3.1.- Actividad del agua y humedad relativa mínima de equilibrio para el crecimiento de algunos hongos de almacenamiento, a una temperatura óptima de 26° a 30°C.

Hongos	Actividad de agua	Humedad relativa de equilibrio (%)
<i>Aspergillus halophilicus</i>	0.68	68
<i>Aspergillus restrictus</i>	0.70	70
<i>Aspergillus glaucus</i>	0.73	73
<i>Aspergillus candidus</i>	0.80	80
<i>Aspergillus ochraceus</i>	0.80	80
<i>Aspergillus flavus</i>	0.85	85
<i>Penicillium spp</i>	0.80 a 0.90	80 a 90

Fuente: Arias Ciro, 1995 *Manual de manejo poscosecha de granos a nivel rural*. Oficina Regional de la FAO para América Latina y el Caribe. Santiago, Chile

Daños causados por hongos de almacenamiento:

- Disminución del poder germinativo.
- Decoloración de la semilla.
- Calentamientos.
- Cambios bioquímicos.
- Posible producción de toxinas.
- Pérdida de materia seca.

Además puede haber transformaciones bioquímicas, modificaciones celulares, podredumbre. Muchos hongos del campo y del almacenamiento producen sustancias tóxicas, conocidas como micotoxinas, que en dosis elevadas, son fatales para el hombre y los animales. La producción de micotoxinas depende de la especie del hongo y de las condiciones ambientales. La más común y potencialmente más tóxica es la aflatoxina producida por *Aspergillus flavus*. Otros tóxicos como la ochratoxina de *Aspergillus ochraceus*, la rubratoxina de *Penicillium rubrum* y la haptoxina de *Penicillium visidicatum* también pueden ser producidas²³.

AFLATOXINAS

Un factor crítico en el control de los hongos es la producción de aflatoxinas. Esto sucede generalmente a las temperaturas óptimas de los hongos que las producen, de 25 a 35°C. Son producidas solamente por *Aspergillus flavus* y *Aspergillus parasiticus*²⁴, aunque se conocen nuevos casos de aflatoxinas producidas por *Aspergillus ruber*²⁵.

La presencia de aflatoxinas puede suceder en dos situaciones:

- en el campo, dependiendo de la temperatura, la humedad y el vigor, siendo aquí de significativa importancia *Aspergillus flavus*³.
- en la etapa de posproducción, si el contenido de humedad del grano es mayor a 16.5%.

CONTROL

Detección: se puede hacer por observación directa con luz UV o por medición de la producción de CO₂, y se puede determinar la pérdida de calidad de los granos así como predecir el tiempo permisible de almacenamiento (TPA)¹⁷.

Control: Un buen almacenamiento depende de la buena calidad del producto almacenado. Se debe evitar la ocurrencia de daños mecánicos, ataque de insectos y roedores y atraso en la colecta. Un pre-secado del producto es muy importante, y todo el equipo utilizado así como del local del almacenamiento deben ser limpios para evitar que se creen focos de contaminación. El crecimiento de hongos se evita normalmente efectuando un secado de tal forma que el A_w final del grano no lo

permita. Aunado a temperaturas bajas, favorecidas por sistemas de aireación, el control es más eficiente.

Para el combate de hongos se toma una de las tres medidas siguientes:

1. Reducción de la humedad relativa y de la humedad del grano.
2. Baja temperatura de almacenamiento.
3. Las dos cosas.

No obstante, existen otras alternativas complementarias:

- Uso de inhibidores químicos si el grano es para la alimentación animal.
- Uso de fungicidas si el maíz es para semilla.

Como medidas preventivas en el campo pueden citarse:

- Evitar el estrés por falta de agua.
- Sembrar híbridos o variedades más resistentes al estrés

En el almacén pueden aplicarse tratamientos químicos, normalmente con ácidos orgánicos y sus sales, pero en México son de poco uso y de pocos resultados. El más utilizado (en Europa y Estados Unidos) es el ácido propiónico, en maíz con alta humedad destinado al ganado, aunque existen algunas especies resistentes como *Aspergillus flavus*²⁶.

Estos inhibidores presentan sin embargo algunos inconvenientes:

- Son corrosivos.
- Reducen el poder germinativo de las semillas.
- Imparten olor y sabor desagradable.

Por lo anterior sólo se aplican en maíz para el ganado, no para consumo humano ni para semilla.

Los fungicidas se aplican a la semilla en el momento de germinar para protegerla de los hongos “de campo”, los cuales invaden a las semillas en plantas o en el suelo. Son efectivos para prevenir la

infección más que para combatirla cuando ya está establecida. Tienen mayor efectividad a humedades de 14-15%. En el almacén, maíz con 16% de humedad puede ser conservado más de cinco meses gracias al fungicida³.

Se puede ejercer un buen control combinando opciones: la suma de la aplicación de ácidos, en particular del ácido propiónico, con la práctica del secado del grano con baja temperatura, parece que ofrece ventajas sobre el uso convencional y reduce costos de secado³.

3.4.- INSECTOS DE LOS GRANOS ALMACENADOS

Los insectos son causa de deterioro no solamente por los granos que consumen sino también por los excrementos que dejan en ellos, volviendo al grano inadecuado para consumo humano y facilitando las infestaciones por hongos.

Además los insectos se consideran importantes agentes que pueden causar daños a las semillas tanto en el campo como durante el almacenamiento, reduciendo drásticamente su calidad. Si la población de insectos crece en forma desmesurada, además de reducir la calidad del grano, se produce un incremento de la temperatura y humedad de los granos, un aumento del contenido de CO₂ y una reducción del contenido de O₂ del medio ambiente.

Los insectos son portadores de hongos que pueden debilitar o consumir las semillas o atacar la plántula que de ella se origina. Algunos forman capullos y telas, que unen los granos formando conglomerados que hacen más difíciles las operaciones de aireación y control fitosanitario. Los insectos más perjudiciales son aquellos que se alimentan del embrión y que destruyen el poder germinativo de la semilla. Los insectos que viven en el interior de la semilla se alimentan principalmente del endospermo, en cuyo caso el embrión no es afectado directamente, pero la reducción parcial o total de las reservas alimenticias hace que la semilla pierda su vigor y produzca una plántula débil o incapaz de sobrevivir.

Los insectos que habitan en los granos almacenados son en su mayoría de naturaleza subtropical y no de climas fríos por lo que su temperatura óptima de crecimiento debe estar entre 27°C y 37°C. Al

disminuir la temperatura de la masa de granos abajo de 17°C, el desarrollo de la mayoría de las especies es insignificante¹⁷. Los límites de temperatura, mínima y óptima, para el desarrollo de las diversas especies de insectos que infestan los granos almacenados se indican en el cuadro 3.4.1.

Cuadro 3.4.1.- Temperaturas, mínimas y óptimas, para el desarrollo de diversas especies de insectos que infestan los granos almacenados

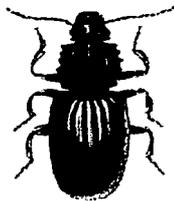
Insectos	Temperatura (°C)	
	Mínima	Óptima
<i>Sitophilus orizae</i>	17	23-21
<i>Oryzaephilus mercator</i>	20	31-34
<i>Oryzaephilus surinamensis</i>	21	31-34
<i>Tribolium confusum</i>	21	30-33
<i>Tribolium castaneum</i>	22	32-35
<i>Lasioderma serricorne</i>	22	32-35
<i>Cryptolestes pusillus</i>	22	28-33
<i>Cryptolestes ferrugineus</i>	23	32-35
<i>Rhyzopertha dominica</i>	23	32-35
<i>Trogoderma granarium</i>	24	33-37

Fuente: Arias Ciro, 1993. *Manual de manejo poscosecha de granos a nivel rural*. Oficina Regional de la FAO para América Latina y el Caribe. Santiago, Chile.

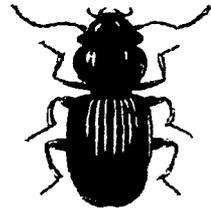
Figura 3.4.1.- Insectos más comunes en los granos almacenados.



Sitophilus

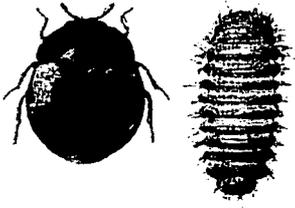


Oryzaephilus



Cryptolestes

III.- Calidad de los granos, factores que la afectan.



Trogoderma



Anagasta

Se puede esperar desarrollo notable de insectos a temperaturas entre 20 y 35°C. Algunos insectos pueden desarrollarse a bajas temperaturas, como los del género *Sitophilus*¹⁷, pero en general los insectos más importantes en el deterioro de maíz almacenado crecen a humedades relativas cercana a 70%, a las cuales pocos hongos crecen o lo hacen lentamente. En regiones muy frías, los insectos alcanzan niveles de reproducción tan bajos que no llegan a caracterizarse como plagas²⁶.

El contenido de humedad de los granos es otro factor crítico para la sobrevivencia del insecto. Los insectos toman de las semillas la humedad que requieren para sus procesos vitales. El aumento del contenido de humedad favorece la proliferación de los insectos; sin embargo, por sobre un cierto límite, el desarrollo de microorganismos inhibe el de los insectos. Cereales con humedad inferior al 10% inhiben la actividad de los insectos¹⁷.

CONTROL

La infestación se origina tanto en el campo como en el almacén, en donde la semilla puede infestarse fácilmente al ser almacenada cerca de productos ya infestados. Los daños causados por la infestación de campo pueden evitarse si se cosecha la semilla tan pronto esté madura y se la somete a un secado y fumigación oportuna.

La temperatura y la humedad son los principales factores que influyen en el desarrollo de los insectos, por lo que su control será nuevamente determinante en la prevención de infestaciones por ellos.

Tratamientos químicos:

Lo más popular en preservación de granos es el uso de insecticidas, no obstante la resistencia que crean de día en día entre las plagas de insectos o su residualidad tóxica que afecta la salud humana. En su utilización deben de considerarse la dosis empleada, el costo extra que implica y la capacitación y conocimiento de la persona que lo aplica. Los que comúnmente se emplean son el malatión, el lindano, el fenitión, el idophenphos y otros.

Se ha visto que de entre los más adecuados está el perietrio sinergizado con butóxido de piperonilo y otros de origen vegetal menos tóxicos⁸ y de residualidad moderada. Como fumigantes se emplean HCN, bromuro de metilo, fosicloropierina, SO₂ y otros. El sector comercial limita el uso de estos productos por diversas causas (costo, necesidad de capacitación, toxicidad, disponibilidad, etc...), mientras que a nivel rural muchas veces por ignorancia se abusa de ellos.

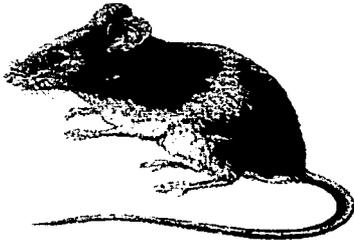
3.5.- ROEDORES

Cualquier estructura de almacenamiento de granos debe contener con dos especies de roedores comensales, la rata noruega (*Rattus norvegicus*) y el ratón doméstico (*Mus musculus*) representados en la figura 3.5.1, los cuales ocasionan grandes daños a los cultivos y a los productos almacenados. Los cereales son muy vulnerables al ataque de los roedores, por lo que probablemente son los que ocasionan mayores daños a los productos almacenados de los pequeños agricultores.

Las pérdidas que ocasionan los roedores a los productos almacenados pueden ser de tres tipos: en primer lugar, los roedores consumen una cierta cantidad del producto; en segundo lugar contaminan una cantidad mucho más grande de productos y, por último, causan graves daños a los envases. Además de los daños directos que ocasionan a los productos almacenados, los roedores también son portadores de enfermedades transmisibles a los seres humanos. Los productos almacenados, contaminados por

excrementos, orina y parásitos de los roedores son focos de contaminación para quienes los manejan o consuman¹⁷.

Figura 3.5.1.- Roedores más comunes en el ataque de granos almacenados.



Ratón doméstico



Rata noruega

3.6.- CONTROL INTEGRAL

Un control de plagas integral en cualquier almacén de granos debe pensarse para asegurar la protección del grano y mantener su calidad controlando la población de plagas mientras se minimizan los efectos en las personas y el medio ambiente.

El control de plagas debe concebirse como una medida preventiva principalmente aunque también debe estar pensado para suprimir o detener daños, y para utilizar pesticidas. En vez de buscar erradicar completamente las plagas, el control se enfoca a la prevención de su desarrollo, o al mantenimiento de su población a un nivel bajo, sin que cause daños económicos grandes.

Un control de plagas efectivo consiste en cuatro principios básicos:

1. Exclusión: busca prevenir la entrada de plagas al silo, es decir anular problemas antes de que se inicien.

2. **Supresión:** se refiere a la intención de suprimir las plagas debajo de un cierto nivel en el cual causarían daños económicos.
3. **Erradicación:** persigue eliminar completamente algunas plagas cuya presencia, aún mínima, no se puede tolerar.
4. **Resistencia:** se prefiere almacenar grano cuya variedad sea resistente a ciertas plagas.

La puesta en marcha del control de plagas contempla las siguientes medidas:

- Identificación del tipo de plaga y conocimiento del método específico de combate.
- Prevención de infestación desde el campo hasta el almacén.
- Monitoreo periódico del grano almacenado.
- Buenas prácticas de almacenamiento: limpiar el silo cada cierto tiempo, evitar guardar grano infestado, operar el sistema de aireación, eventualmente aplicar pesticidas, etc.

Administración del grano en el silo:

Tratamientos superficiales: se aplican justo después de llevar el silo para prevenir la entrada de insectos alados como palomillas del exterior. También se emplean para prevenir reinfestaciones después de una fumigación. Es una medida únicamente preventiva, no correctiva. Se puede usar malatión, o últimamente se ha propuesto el uso de *Bacillus thuringiensis*²⁷, bacteria que controla las larvas de palomillas.

Monitoreos: debe inspeccionarse el silo al menos una vez por semana y obtenerse muestras de todas las zonas. Es importante monitorear variables como temperatura, humedad, actividad biológica, grado de infestación, atributos sensoriales, etc.

Aireación: para mantener la calidad del grano, debe airearse, para igualar la temperatura del grano en todo el silo. Con esto se previene la formación de zonas de acumulación de calor o humedad y se evitan problemas como el "caking" que es la compactación del grano a causa del desarrollo de hongos y/o acumulación de humedad, y se controla el desarrollo de hongos e insectos. Este tema se discute más ampliamente posteriormente.

Fumigación: si a pesar de haber tomado las precauciones mencionadas ocurre infestación, el grano debe fumigarse. Esta acción es la más común en control de insectos pues los elimina al igual que a sus huevos, sin embargo no protege al grano de una reinfestación. Es una medida primordialmente correctiva ya que generalmente tiene implicaciones de toxicidad. Generalmente se emplean gases presurizados (son los más efectivos) pero también se venden como polvos. Los más comunes son bromuro de metilo, fósforo de aluminio, pirimifos metil, que son insecticidas comerciales, aunque se han contemplado alternativas en productos naturales. El objetivo de la fumigación es tratar de confinar un gas por un periodo de tiempo suficiente, a una concentración adecuada, para que sea letal a todas las plagas, en todos sus estados reproductivos. El éxito de la fumigación dependerá de que tan hermético sea el silo.

Los organismos vivos son los más importantes, pero no los únicos causantes de pérdida de calidad de los granos almacenados. Los daños en el almacenamiento se traducen a decoloración, pérdida de la germinación, aumento de la cantidad de ácidos grasos en los granos y degradación de su calidad nutritiva, todos ellos a causa de la actividad biológica de los granos mismos. La respiración es el proceso principal de dicha actividad y conlleva a la liberación de energía, gran parte en forma de calor, el cual si no es disipado, favorece el desarrollo de plagas.

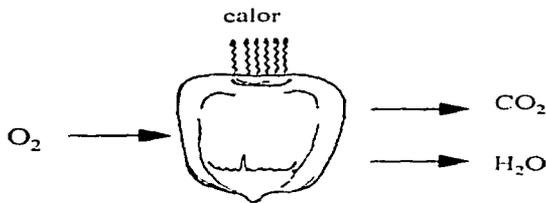
3.7.- EL PROCESO RESPIRATORIO

Los granos, aún cuando son separados de la planta de procedencia, son seres vivos que después de ser cosechados continúan viviendo y, como todos los organismos vivos, respiran. Pueden hacerlo en condiciones aerobias o anaerobias.

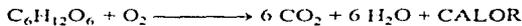
Respiración aerobia:

La respiración en presencia de oxígeno libre es el proceso por medio del cual las células vivas de los vegetales oxidan los carbohidratos y las grasas, por medio del oxígeno atmosférico, produciendo gas carbónico (CO₂) y agua (H₂O) y liberando energía en forma de calor

Figura 3.7.1.- Respiración aeróbica



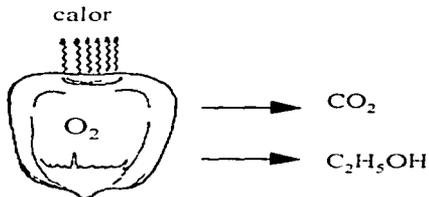
Este proceso se representa por la siguiente ecuación:



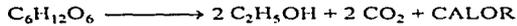
Respiración anaerobia:

La respiración anaeróbica se produce sin la presencia de oxígeno libre; los productos finales de la respiración en este caso se componen de gas carbónico y algunos compuestos orgánicos simples, como el etanol. Aquí el oxígeno también forma parte activa de las reacciones de oxidación; no obstante, las células no reciben el oxígeno desde el exterior, sino que este se obtiene de la propia célula. Las fermentaciones son procesos de respiración anaeróbica.

Figura 3.7.2.- Respiración anaerobia.



La descomposición de carbohidratos también puede ser resultado de la respiración anaerobia de algunas levaduras. La siguiente ecuación representa este proceso:



3.7.1.- Factores que afectan la respiración

La respiración, directamente relacionada con la pérdida de sustancias nutritivas, es afectada por diversos factores como son:

- temperatura: el aumento de temperatura puede acelerar la respiración dos o tres veces hasta un cierto límite, alrededor de 40°C, arriba del cual disminuye como resultado de los efectos destructores de altas temperaturas sobre las enzimas¹⁷.
- contenido de humedad de los granos: los granos almacenados con humedad entre 10 y 15% tienen un proceso respiratorio lento. Sin embargo, si se aumenta el contenido de humedad, se acelera considerablemente la respiración y, en consecuencia, ocurre un deterioro. Es por esto que el contenido de humedad del producto es un factor fundamental para su conservación.
- desarrollo de hongos e insectos: parte significativa del gas carbónico que se produce durante la respiración se genera por el metabolismo de los insectos presentes en los granos secos y a los hongos presentes en los granos húmedos. Cuando los hongos son los principales responsables del aumento del proceso respiratorio se puede llegar a un punto en que los granos húmedos dejan de ser organismos vivos y pasan a ser un sustrato alimenticio de los hongos, que siguen respirando y transformando la materia seca de los granos en CO₂, agua y calor.
- composición del aire ambiente: la composición del aire ambiente de almacenaje (relación entre gas carbónico y oxígeno) también afecta la respiración de los granos, cuanto mayor sea la proporción de CO₂ y menor la de O₂, menor será la intensidad respiratoria de los granos.

3.7.2.- Consecuencias del proceso respiratorio

Pérdida de peso:

Mientras más intenso sea el proceso respiratorio, se observará mayor consumo de sustancias orgánicas, rápido deterioro del producto y mayor pérdida de materia seca y peso.

Calentamiento de los granos:

-calentamiento de granos secos, ocasionado por insectos que pueden desarrollarse en los granos con humedad de 15% o menos, lo que produce temperaturas de hasta 42°C¹⁷.

-Calentamiento de granos húmedos ocasionado por microorganismos que se desarrollan en los granos con humedad de 15% o más, lo que produce temperaturas de hasta 62°C¹⁷.

Estos dos tipos de calentamiento se pueden desarrollar simultáneamente en la masa de los granos, por lo que el calentamiento de los granos secos se puede convertir en calentamiento de granos húmedos. La respiración del grano es un evento no deseable durante el almacén del grano, por lo que debe minimizarse. Lo anterior se logra a lo largo de la cadena de poscosecha controlando las dos variables que más influyen en el proceso respiratorio, la humedad y la temperatura, gracias a las dos operaciones esenciales: el secado y la aireación.

3.8.- MUESTREO

Para realizar una determinación en un lote de granos, es necesario tomar una muestra representativa. La técnica de muestreo busca entonces conseguir una pequeña cantidad del material que posea las características medias del conjunto. Existen diferencias entre los muestreos de producto empacado en sacos, a granel, o en transporte. Según la accesibilidad y cantidad de granos a muestrear se usan diferentes equipos (caladores, de alvéolos, de bala, neumáticos...). Cuando el tamaño de la muestra es relativamente grande, debe homogenizarse, un equipo de uso común para este fin es el "Boerner".

Clasificación de muestras:

- simple: cada pequeña porción de granos retirados de un muestreador, en diferentes puntos.
- compuesta: formada por la combinación de todas las muestras simples retiradas del lote, generalmente mayor a la requerida para los análisis.
- media: la que recibe un laboratorio, suficiente para realizar todos los análisis.
- de trabajo: proveniente de la reducción de la muestra media, y usada en cada test a realizar.

Todas las muestras deben de ser identificadas y guardadas en recipientes herméticos que aseguren su conservación tal cual se obtuvieron.

Desde la cosecha hasta su consumo, se busca que los granos conserven al máximo su calidad, ejerciendo un control de todas las variables que influyen en ella, dos principalmente, la temperatura y la humedad del aire y del grano. Si a lo largo de la cadena de poscosecha estas dos variables se mantienen en los niveles deseados, el consumidor podrá beneficiarse de un producto de primera calidad. Pero como no es fácil lograrlo, se persigue constantemente la optimización de las infraestructuras de poscosecha, sobre todo de almacenamiento, en donde normalmente ocurren las pérdidas de calidad del producto.

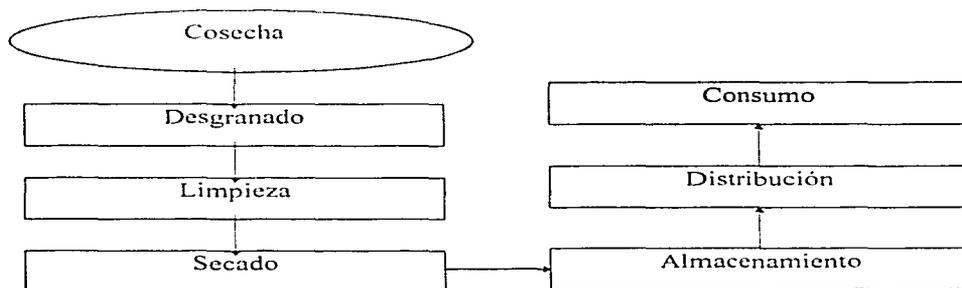
CAPÍTULO IV

LA CADENA DE POSCOSECHA

Se entiende por sistema poscosecha al conjunto de procesos técnicos y operativos que engloban desde el acopio hasta la comercialización y cuyo funcionamiento permite garantizar la conservación adecuada de los productos agrícolas para satisfacer así la demanda de los consumidores.

Ahora se menciona un nuevo concepto, se tiende a no hablar de sistema poscosecha sino de sistema de posproducción. Así se identifica el punto de arranque: el programa de posproducción empieza en la madurez fisiológica del producto y va hasta el consumidor, "de la horeca hasta el tenedor"²⁸. Con este concepto se incluye entre las preocupaciones de los encargados de conservar el producto a la cosecha, operación crucial para la calidad del grano que se va a almacenar y que es fuente importante de daños y pérdidas.

Un esquema simplificado de las etapas de posproducción del maíz es el siguiente:



Los granos son cosechados a menudo con un contenido de humedad demasiado elevado para un almacenamiento seguro. Es esencial entonces brindarle al grano recién cosechado un tratamiento para prevenir el deterioro de su calidad debido al desarrollo de los hongos.

Existen ciertos tratamientos poscosecha para asegurar la preservación a corto y a largo plazo de los granos. El secado es el método más amplia y comúnmente utilizado, aunque también otras técnicas también se emplean, con objetivos específicos, como el almacenamiento hermético, los tratamientos químicos, aplicación de frío, etc.

Generalmente se cosecha el maíz cuando alcanza su madurez fisiológica, cuando deja de acumular hidratos de carbono y otros nutrientes. Es el momento en que posee mayor peso seco, pero aun así contiene de 30 a 35% de humedad, por lo que el producto cosechado es altamente perecedero, factor importante para el almacenamiento sobretodo en climas cálido y/o húmedos. En este tipo de ambientes el maíz con alta humedad puede presentar en cuestión de horas crecimiento microbiano y desarrollar olores indeseables. Por lo anterior, es imperativo que se apliquen inmediatamente procedimientos apropiados de acondicionamiento del grano.

Sin embargo tal procedimiento no es rentable por toda la infraestructura que demanda la cosecha y el secado, por lo que se recurre al secado en campo de las mazoreas hasta que alcanzan una humedad de más o menos 14%; y mientras tanto quedan expuestas al ataque de hongos e insectos.

Debe evitarse lo más que se pueda la permanencia del grano en el campo pues esto es sinónimo de daño y pérdida de calidad. En algunos casos este problema se resuelve mediante el uso de secadores, pero tienen el inconveniente de que son costosos. Una alternativa más económica es el silo solar hexagonal, el cual como se verá más adelante, es capaz de secar el maíz en su interior, sin tener que exponerlo a la intemperie. Para que el secado del grano sea lo más efectivo posible, es importante limpiarlo antes de que se integre a un sistema de secado, cualquiera que este sea.

4.1.- LIMPIEZA

Los cereales cosechados manual o mecánicamente siempre contienen impurezas. Para la conservación de los granos durante el almacenamiento es necesario considerar dos aspectos importantes de las impurezas; uno de ellos

es el hecho de que su presencia hace más difícil la conservación de los granos, porque normalmente son higroscópicas y tienden a humedecer los granos, además de ser un medio favorable para el desarrollo de insectos y microorganismos. El otro aspecto se refiere a la dificultad que presentan para la buena operación de las unidades almacenadoras, ya que las impurezas crean una barrera para el paso del aire de secado o aireación, o de insecticidas y fumigantes, al ocupar los espacios intergranulares. Además las impurezas constituyen un riesgo de incendio cuando quedan depositadas en el interior de los silos, ya que pueden entrar fácilmente en combustión¹⁷.

La limpieza de cereales consiste en la eliminación total o parcial de las impurezas, para facilitar su conservación durante el almacenamiento y para cumplir las normas sobre el contenido de impurezas en el momento de la comercialización.

La separación de impurezas de los granos se basa en las diferencias que existen entre las propiedades físicas de los mismos y las impurezas. Las máquinas de limpieza realizan la separación en función de tres características básicas: tamaño, forma y velocidad terminal.

La limpieza de los granos es una práctica casi desconocida en México, por falta de equipo de cribado a pesar de que las normas imponen restricciones al contenido de impurezas.

Una vez cosechado y limpiado el grano, este deberá transferirse inmediatamente a una sistema de conservación. Esta etapa incluye en la mayoría de los casos el secado natural o artificial y el almacenamiento, para cuyos fines existe una amplia gama de opciones. El silo solar hexagonal integra estos dos eventos en la misma estructura, y se discute su funcionamiento en los siguientes capítulos.

4.2.- EL PROBLEMA DE LAS PÉRDIDAS

La evaluación exacta del volumen de pérdidas durante la cadena de posproducción es una tarea complicada y laboriosa, pero se manejan datos oficiales de menos del 5% y extraoficiales de más del 20%³. Lo que es verdad es que parte de los granos que se cosechan no llegan al consumidor y otra parte llega con una calidad inferior, es decir existen las pérdidas en cantidad y en calidad (sanitaria, nutricional, etc.). Como ya se

observó en los antecedentes, tan solo las pérdidas poscosecha de maíz en México representan una suma impresionante.

Las pérdidas del grano ocurren desde el campo incluso antes de ser cosechados, por factores climáticos y biológicos. En el período de la poscosecha las causas del deterioro son diversas:

- Reacciones de Maillard durante el secado o calentamiento “biológico” accidental o almacenamiento prolongado.
- Pérdida de vitaminas.
- Oxidación no-enzimática de lípidos
- Daños por enzimas, especialmente hidrolíticas (proteasas, lipasas, etc.)
- Ataques biológicos (microorganismos, insectos, roedores, etc.)
- Daños mecánicos a causa del manejo.

Para evitar las pérdidas poscosecha se pueden tomar diversas medidas enfocadas al grano mismo o bien al sistema de su manejo.

Una alternativa es el mejoramiento genético de la calidad de almacenamiento de los granos y la calidad biológica de las semillas. La creación de genotipos más vigorosos serviría para:

- Limitar el desarrollo de los hongos, aún cuando pierdan su viabilidad.
- Aumentar la resistencia al ataque de insectos que dañan la mazorca y que permiten o facilitan la entrada de los hongos.
- Obtener mejor cobertura de la mazorca.
- Generar maíces más tolerantes al daño mecánico.
- Generar maíces que sequen más rápido.
- Generar maíces que no sean buen sustrato para la producción de toxinas.

Otra alternativa es el almacenamiento hermético, en el cual se reduce la concentración de oxígeno y aumenta la de CO₂ por respiración de hongos, insectos y semillas, inhibiéndose así el desarrollo de hongos e insectos. El almacenamiento hermético es una excelente alternativa para la conservación de los granos en el medio rural, en aquellas regiones donde los productores guardan parte de sus cosechas para su autoconsumo, como es el caso de México³.

CAPÍTULO V

SECADO

Se entiende por secado de materiales biológicamente activos la remoción de agua a un nivel tal que se mantiene su humedad en equilibrio con el ambiente del almacenamiento, preservando su apariencia y calidad nutritiva así como su viabilidad como semilla¹⁸. Se le conoce también como acondicionamiento.

El objetivo principal del secado es reducir el contenido de humedad de manera que se evite el deterioro del producto antes de que sea utilizado, mientras se almacena.

Para el secado artificial de granos existen básicamente dos métodos: uno que emplea altas temperaturas (entre 45 y 120°C, o más en algunos casos) y el otro, que emplea bajas temperaturas. El secado a bajas temperaturas (con o sin calentamiento suplementario del aire de secado) es un proceso de gran eficiencia energética, con el cual se obtiene un producto final de óptima calidad cuando se realiza en forma adecuada, ya que la temperatura se incrementa unos pocos grados más arriba de la temperatura ambiente (menos de 10°C)¹⁷. Esta última forma de secado es la que emplea el silo solar hexagonal.

El principal problema que presenta el secado de granos a bajas temperaturas lo constituye el peligro de deterioración del producto debido al largo tiempo que se requiere para el secado. La ventaja es que en el secado a bajas temperaturas el grano puede ser almacenado en el lugar del secado. El secado artificial con altas temperaturas es más rápido; sin embargo, la eficiencia energética es menor¹⁷.

Una disminución de la calidad por temperaturas elevadas durante el secado se puede observar en algunas características como consistencia, contenido energético, palatabilidad, dureza, color, humedad y contenido de proteínas y aminoácidos, todas las cuales son afectadas. Pero estos daños no son críticos y pueden ser minimizados controlando adecuadamente el proceso¹⁴.

El secado del maíz en México se efectúa en prácticamente todos los casos al natural, exponiendo el producto al sol. El secado artificial, un proceso costoso, sólo se aplica a parte del sorgo y maíz en

Tamaulipas⁸. Es por esto que el silo solar hexagonal constituye una ventajosa opción para secar el grano lejos del alcance de todo tipo de plagas y además en forma económica, eficiente y ecológica.

5.1.- SECADO EN EL SILO

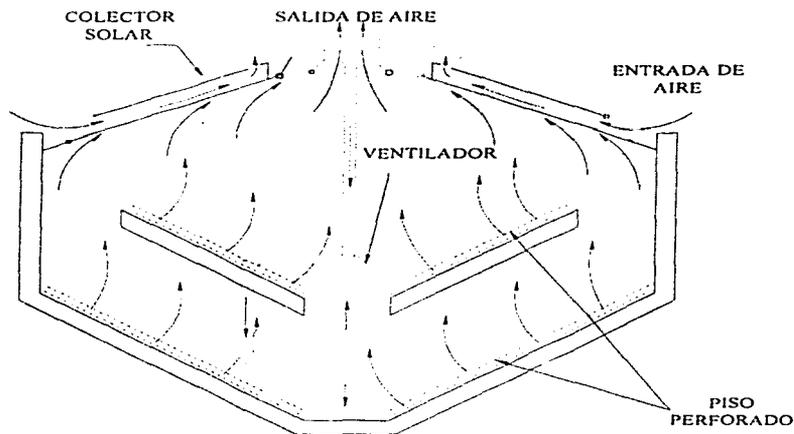
El secado a bajas temperaturas se realiza en silos secadores-almacenadores, como el silo solar hexagonal, donde el producto permanece almacenado durante y después del secado. Este tipo de estructuras poseen algunas características especiales que no son necesarias en los silos que se emplean solamente para almacenamiento, como el piso que debe consistir en una placa metálica que tenga por lo menos el 10% del área perforada para facilitar la distribución uniforme del aire, lo cual es muy importante para la eficiencia del proceso. El silo-secador también requiere de un sistema de distribución de aire, con un ventilador que debe proveer la cantidad suficiente de aire para secar toda la masa de granos, sin que se presente deterioro (ver figura 5.1.1)¹⁷.

El secado a bajas temperaturas es similar al secado natural en el campo. El producto pierde humedad hasta que se establece el equilibrio entre la humedad del aire y la humedad del grano. Como este proceso es lento, al final casi toda la masa de granos queda en equilibrio térmico e higroscópico con las condiciones psicométricas del ambiente. La diferencia entre los dos tipos de secado lo constituye la forma de mover el aire: en el secado a bajas temperaturas, el aire es forzado a pasar por la masa de granos por medio de un ventilador, mientras que en el campo, el secado se realiza por la acción del viento. Sin embargo es claro que dentro del silo la facilidad del control de las plagas es muy superior a la del campo¹⁷.

Las condiciones atmosféricas (HR y temperatura) bajo las cuales se realiza el secado determinan la humedad final que puede alcanzar la masa de granos, ya que cada combinación de temperatura y humedad relativa del aire corresponde a un contenido de humedad en equilibrio con el producto y este contenido varía para cada producto. Estos valores se relacionan mediante ecuaciones representadas en isotermas (ver capítulo 3). La temperatura y la humedad relativa del aire cambian durante todo el proceso de secado, por lo que sus valores promedio determinan el contenido de humedad final. Los ventiladores generalmente calientan el aire de 1 a 2°C, disminuyendo ligeramente su humedad relativa.

Para aumentar la temperatura en por lo menos 6°C es necesario utilizar colectores solares u otros medios de calentamiento²⁹.

Figura 5.1.1.- Componentes del silo para el secado.



Como no se pueden controlar las condiciones climatológicas, generalmente el aire de secado no tiene la humedad relativa y temperatura correspondientes al contenido final de humedad deseado, es decir, la humedad relativa de equilibrio del grano puede finalmente ser mayor o menor a la que se quiere obtener. No porque el aire esté seco el grano se sobresecará ni tampoco porque esté húmedo el grano nunca se secará. Se recurre entonces a controlar el tiempo de secado, o bien el gasto de aire.

En las unidades de almacenamiento pequeñas, el sistema es muy interesante porque la inversión inicial de capital es menor que la que se requiere para instalar sistemas que emplean altas temperaturas³⁰.

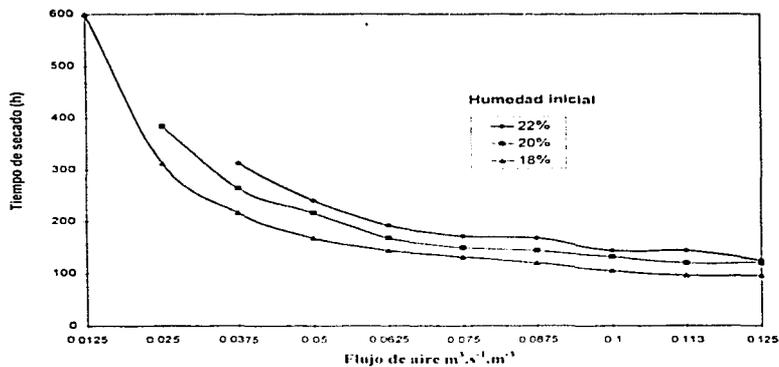
En el secado en el silo, la pérdida de humedad es lenta y el producto no está sometido a cambios bruscos, lo que evita las tensiones internas de los granos. además el producto tiene menos movimientos, con lo que se reducen los daños mecánicos y todo esto influye para conservar la calidad del grano, la cual resulta mejor comparada con la que se obtiene después del secado a altas temperaturas³⁰.

Una de las grandes limitantes del secado a bajas temperaturas lo constituye la humedad inicial del producto. Cuanto mayor sea ésta, más rápido es su deterioro, sobretodo en las capas superiores, si no se reduce rápidamente dicha humedad hasta un nivel seguro para el almacenamiento. Esto significa que a mayor humedad del producto es necesario aumentar considerablemente la cantidad de aire que se requiere para el secado y, por lo tanto, se necesitan ventiladores con motores más potentes (ver gráfica 5.1.1). Humedades superiores al 30% b.s. propician el deterioro en corto tiempo, exigiendo altos flujos del aire de secado, y por lo tanto ventiladores muy poderosos, volviendo el sistema inviable técnica y económicamente¹⁷.

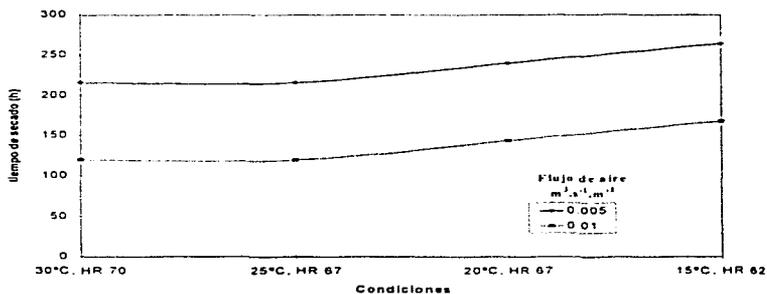
Este problema puede solucionarse adoptando un sistema de secado combinado, con un pre-secado a altas temperaturas, en secadores convencionales. En este caso, la humedad del producto sería reducida a niveles seguros para el implemento de secado a bajas temperaturas en silos, con energía solar. Tal procedimiento, además de evitar el deterioro del producto, acarreará una economía sustancial de tiempo y de energía convencional.

La temperatura del aire es otro factor que es necesario considerar, ya que el proceso de deterioración también se acelera con el aumento de la temperatura (ver gráfica 5.1.2). En México, donde predominan climas cálidos, se recomienda la utilización del secado a bajas temperaturas para granos cuyo contenido de humedad es menor del 25% b.h., ya que para humedades superiores se impediría la viabilidad económica del sistema¹⁷.

Gráfica 5.1.1.- Influencia del flujo de aire y del contenido de humedad inicial en el tiempo de secado de maíz para una temperatura de bulbo seco de 30°C y HR 70%¹⁷.



Gráfica 5.1.2.- Influencia de las condiciones del aire (T y HR) y del flujo de aire en el tiempo de secado de maíz con humedad inicial de 20% b.h.¹⁷



5.1.1.- Deterioro del producto

Como ya se ha mencionado, los hongos son una de las principales causas de deterioro de los granos en los sistemas de secado a bajas temperaturas, por lo que deben de calcularse con sumo cuidado los sistemas del silo secador en climas tropicales. El cuadro 5.1.1 presenta las especies de hongos más comunes y el contenido de humedad mínimo para su desarrollo en maíz, así como las temperaturas mínimas y óptimas para su desarrollo de hongos. Si el contenido de humedad no se mantiene bajo los niveles citados en el cuadro 5.1.1, siempre existirá el peligro del ataque de hongos.

Cuadro 5.1.1.- Contenido de humedad mínimo en algunos granos para el desarrollo de hongos de almacén.

Especie	Temperatura Mínima (°C)	Temperatura Óptima (°C)	Rango de humedad (%)
<i>Aspergillus restrictus</i>	5 - 10	30 - 35	13.5 - 14.5
<i>Aspergillus glaucus</i>	0 - 5	30 - 35	14.0 - 14.5
<i>Aspergillus candidus</i>	10 - 15	45 - 50	15.0 - 15.5
<i>Aspergillus flavus</i>	10 - 15	40 - 45	18.0 - 18.5
<i>Penicillium sp</i>	-5 - 0	20 - 25	16.5 - 19.0

Fuente: Arias Ciro. 1993. *Manual de manejo poscosecha de granos a nivel rural*. Oficina Regional de la FAO para América Latina y el Caribe. Santiago, Chile, p.p. 102.

Otro factor que influye en el deterioro de los granos lo constituye el proceso de respiración, ya que se libera energía a través de la oxidación de nutrientes orgánicos y ocurre pérdida de materia seca. Si esa energía no se disipa, los granos se calientan volviendo más propicio al medio para el desarrollo de los hongos. Es importante recordar que el secado a bajas temperaturas es un proceso dinámico y que si la masa de granos se deja en un silo sin ventilación, con alto contenido de humedad, podrá deteriorarse en menos tiempo que el previsto. Sin aireación, los granos se calentarán como resultado de su proceso respiratorio y del de los hongos, acelerando el proceso de deterioración¹⁷.

5.1.2.- Flujo de aire para el secado

Para la buena operación de del sistema de secado es muy importante la elección de un flujo de aire adecuado. Los flujos de aire por debajo del valor adecuado, retardan el proceso de secado y ponen en peligro la calidad del producto. Por otra parte, los flujos superiores al valor adecuado reducen el tiempo de secado, pero ocasionan un aumento del consumo de energía y de los costos de operación, y una mayor inversión de capital inicial. La adición de calor no necesariamente reduce la cantidad de aire necesaria para el secado y, es más, puede causar sobresecado. Aumentar el gasto es un mejor medio para secar el grano más rápidamente y así evitar riesgos de deterioro¹⁸.

Los flujos de aire que se recomiendan para el secado se llaman generalmente flujos mínimos y se expresan por unidad de volumen de producto. El flujo mínimo de aire depende de los siguientes factores³¹:

- Tipo de producto: en función de su susceptibilidad a la deterioración, facilidad con que los hongos pueden penetrar en su interior y composición química.
- Clima de la región: determina el potencial de secado. Las regiones con altas humedades relativas durante el periodo de secado requieren mayores flujos de aire, con o sin calentamiento suplementario.
- Contenido inicial de humedad: está relacionado directamente con la susceptibilidad del producto al ataque de hongos.

Los flujos requeridos según la humedad del grano se muestran en el cuadro 5.1.2, en donde también se muestran algunas discrepancias entre autores.

Cuadro 5.1.2.- Flujos de aire en función de la humedad inicial del grano.

Humedad (% b.h.)	Humedad (% b.s.)	Flujo de aire (m ³ /min.t) ²⁹
26	35	3.3
24	32	2.2
22	28	1.4
20	25	1.1

Humedad (% b.h.)	Humedad (%b.s.)	Flujo de aire (m ³ /min.t) ¹⁸
25	33	5.5
20	25	3.3
18	22	2.2
16	19	1.1

El flujo mínimo de aire requerido es aquel que asegure el secado antes de que el grano sufra deterioro. Los flujos recomendados mostrados están basados en la vida máxima de anaquel del maíz en determinadas condiciones, datos que se muestran en el cuadro 5.1.3.

También deben considerarse las condiciones climáticas del sitio en donde se realizará el secado. Debe tenerse cuidado sobretodo en zonas húmedas, en donde el aire tiene una humedad relativa superior a 70%. Cuando la humedad relativa debe reducirse, sólo pequeñas cantidades de calor son requeridas, i.e., si la humedad promedio 80% o más, un aumento de 3°C en la temperatura se requiere para secar maíz hasta 15.5% de humedad. Aun cuando la humedad relativa se acerca al 100%, la temperatura del aire sólo necesita aumentarse en unos 6°C²⁹.

Cuadro 5.1.3.- Vida de anaquel del maíz en el almacenamiento con aireación en función de la humedad inicial (días).

°C	Contenido de humedad (%b.h. arriba, %b.s. abajo)							
	18.3	22	25	28.2	31.6	35	39	43
	15.5	18	20	22	24	26	28	30
12.8	299	85	42	25	16	12	9	8
15.6	197	56	28	17	11	8	7	5
18.3	148	42	21	13	8	6	5	4
21.1	109	31	16	9	6	5	4	3
23.9	81	23	12	7	5	4	3	2
26.7	60	17	9	5	4	3	2	2

Fuente: *Grain Drying, Handling and Storage Handbook*, MWPS-13, 2a. edición, 1987; Midwest Plan Service, Ames, IA .

5.1.3.- Resistencia de los granos al flujo de aire

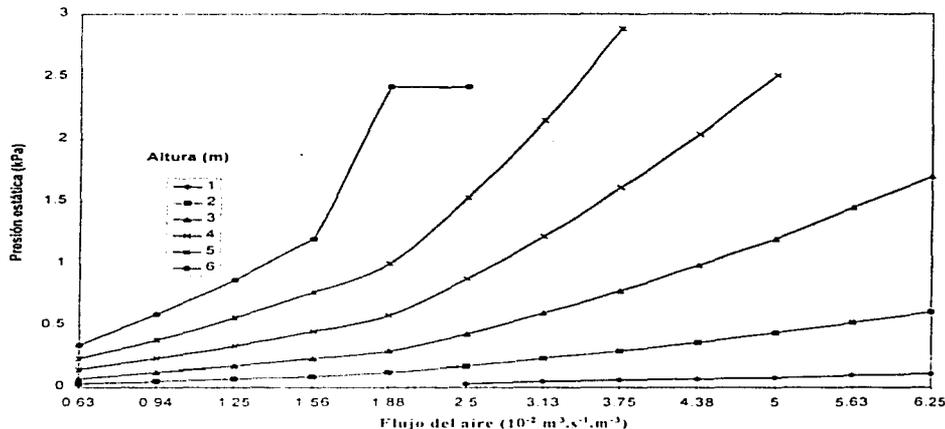
Para escoger un ventilador adecuado para el secado, es necesario determinar la energía mecánica que tiene que transferir el ventilador al aire para vencer la resistencia que presentan los granos. Esta resistencia generalmente se expresa como "presión estática" y depende básicamente de los siguientes factores³⁰:

- Tipo de grano.
- Contenido de impurezas y presencia de granos quebrados.
- Relación base/altura del silo.
- Grado de compactación del producto.

En comparación con otros granos, el maíz tiene grandes espacios intergranulares, por lo que ofrece relativa poca resistencia al aire. La presencia de granos quebrados y material fino incrementa la resistencia al flujo de aire. Además suele concentrarse en puntos donde el aire no se distribuirá de igual manera. Por lo anterior es indispensable limpiar el grano antes de llenar el silo.

Respecto a la altura del silo, se recomienda que no pase de 8 m ⁽¹⁷⁾ (para que la altura del grano no sea mayor de 6 m.), para evitar las presiones estáticas muy altas. En la gráfica 5.1.3 se observa la influencia del flujo de aire y la altura de la masa de maíz sobre la presión estática.

Gráfica 5.1.3.- Presión estática (kPa) requerida para el maíz, en función del flujo de aire, para diferentes alturas de grano.



Fuente: Arias Ciro, 1993. Manual de manejo pososecha de granos a nivel rural. Oficina Regional de la FAO para América Latina y el Caribe. Santiago, Chile, p.p. 111.

Es claro que a mayor altura de grano, el ventilador debe vencer una mayor presión estática, y esta también aumenta conforme se incrementa el flujo de aire.

Para determinar la potencia del ventilador se define un parámetro de gasto unitario de aire Qa :

$$Qa = \frac{G}{Ag} \quad (\text{m}^3/\text{m}^2.\text{s})$$

Donde G es el gasto de aire en m^3/s y A_g es el área transversal del grano por donde pasa el aire, en m^2 , y se calcula según las dimensiones del silo. Para una celda con relación ancho altura 1:2, A_g se puede escribir en función de la altura del silo hs (en m):

$$A_g = 1.1704hs^2 \quad (\text{m}^2)$$

Para determinar el gasto de aire G se utiliza Q ($\text{m}^3/\text{min.t}$), que es un valor ya establecido (se escogen los gastos recomendados en el cuadro 5.1.2):

$$G = Q\delta(hs)^4 \times 4.417 \times 10^{-6} \quad (\text{m}^3/\text{s})$$

δ es la densidad del grano en kg/m^3 .

Entonces Qa se obtiene dividiendo las dos ecuaciones anteriores:

$$Qa = Q\delta hs \times 3.774 \times 10^{-6}$$

Qa se utiliza para calcular un valor empírico ΔP relacionado con la presión estática, para maíz:

$$\Delta P = \frac{2.07 \times 10^4 Qa^2}{\ln(1 + 30.4 Qa)}$$

Finalmente para obtener la potencia requerida del ventilador:

$$W = \Delta P G / hg \times \frac{11}{0.85}$$

Donde hg (generalmente no más de $0.75hs$) es la altura del grano en metros. Se multiplica por un factor $1.1/0.85$: 1.1 para compensar pérdidas en los ductos y 0.85 se refiere a la eficiencia del ventilador.

Escrito de otra forma la potencia es:

$$W = \Delta P Q \delta (hs)^4 \times 4.287 \times 10^{-6} \quad (\text{en watts}) \quad (5-1)$$

El mejor método para distribuir aire equitativamente a través de la masa de granos es usar un piso perforado. Pero de todas formas debe evitarse llenar el silo con grano acompañado de materia extraña, así como sobrellenar el silo, pues en el primer caso pueden formarse zonas en las que se acumule materia extraña, la cual presentaría mayor resistencia al paso de aire y por lo tanto ni se secaría ni se ventilaría correctamente. Esta situación podría generar focos de desarrollo de hongos e insectos.

5.1.4.- El proceso de secado

Cualquiera que sea el método de secado, este se basa en la diferencia entre las presiones de vapor del agua en el ambiente y en el producto: si la presión de vapor del material es mayor que la presión de vapor del ambiente, el agua será removida del material. Inversamente, si la presión de vapor del material es menor que la ambiental, el agua será removida del ambiente para el material.

El grano contiene humedad, y dependiendo de la cantidad de humedad contenida en el aire que rodea al grano, el grano perderá o ganará humedad. La HIRE determinará el mínimo contenido de humedad hasta el cual el grano puede ser secado bajo determinadas condiciones de temperatura y humedad relativa. Se obtienen para el maíz las humedades relativas de equilibrio en función de la temperatura y la humedad del aire por medio de la ecuación de Chung (ver capítulo 3).

Aire de secado: el aire tiene dos funciones principales en el secado. Primero, el aire provee el calor necesario para evaporar la humedad del grano, y segundo, el aire sirve como acarreador de dicha humedad. La cantidad de agua que el aire puede remover del grano depende de su humedad relativa y temperatura, gasto, y contenido de humedad del grano.

Cuando el grano es sometido al secado en el silo, el aire se hace pasar a través del grano, estableciéndose una "zona de secado". Esta última se mueve uniformemente a través de la masa de granos en la misma dirección del flujo de aire. El grano que está directamente en contacto con el aire de secado se seca hasta la humedad de equilibrio con el aire. Pero en algunos casos, debido a la baja humedad relativa del aire el grano puede sobresecarse, problema que presenta comúnmente el grano situado en las entradas de aire. Lo que debe hacerse es controlar la temperatura y humedad relativa del aire que entra, por medio de termostatos y humidistatos que corten la entrada de aire cuando este se encuentre o muy caliente o muy seco (en general no más de 50°C ni menos de 30% HR)¹⁸.

En el silo el secado se lleva a cabo de manera rápida (para un sistema a bajas temperaturas) y eficiente gracias al uso de energía solar para calentar el aire y reducirle la humedad relativa. Sin embargo, el uso de la energía solar no es sencillo, y se discute a continuación una forma de aprovecharla.

5.2.- SECADO CON ENERGÍA SOLAR

Desde 1974, cuando la crisis del petróleo, ha habido gran interés en la posibilidad de usar la energía solar para sustituir las fuentes convencionales de energía (principalmente los derivados del petróleo) para el secado de productos agrícolas o en otras aplicaciones.

Como el secado de granos es una operación de alto consumo de energía, su costo está directamente relacionado con la disponibilidad y costo de la misma. Los combustibles derivados del petróleo son predominantemente utilizados para el secado de granos así como para mover el aire, mientras que la electricidad se usa generalmente en sistemas de secado a bajas temperaturas. Con los colectores solares oscuros aplicados al secado a bajas temperaturas se puede tener un ahorro energético en comparación con el secado convencional, ya que el calentamiento del aire no consumiría ni electricidad ni combustible. De hecho, en el secado de granos a bajas temperaturas no siempre es necesario proveer calor adicional con un sistema solar de secado, lo que hace a este efectivo en costo²⁹.

Desafortunadamente, existen factores que impiden coleccionar y utilizar eficientemente el total de la energía incidente. Primero, el sol no está descubierto todos los días y por otro lado existe dependencia de la región y la contaminación atmosférica con la buena utilización de la radiación solar.

La cantidad de energía solar que puede incidir en una superficie perpendicular a los rayos solares, en un día completamente despejado (en ausencia de nubosidades) es de unas 4800 kCal/día por m² de área colectora²⁹. El valor estándar de la constante solar (1353 W/m²) puede ser considerado como el parámetro básico de la disponibilidad de energía solar, aunque no siempre es muy práctico debido a la variable atenuación de la atmósfera, los cambios en el ángulo de incidencia y las difusiones y reflexiones que puedan ocurrir.

Por otra parte, la orientación del colector tiene un gran efecto en la cantidad total de energía recibida y, en muchos casos, es casi imposible orientar un colector de manera que permanezca perpendicular a los rayos solares. Una opción económica sería aceptar una menor eficiencia de captación de la energía con

la fijación de la superficie colectora en una posición en la que pudiese captar la mayor cantidad de energía¹⁹.

La mayoría de los trabajos que tratan del aprovechamiento de la energía solar para el secado de granos ha sido enfocada a sistemas a bajas temperaturas, una vez que sería difícil su aplicación en sistemas que funcionan a altas temperaturas, debido al alto nivel de energía necesario (30,000 - 70,000 kCal/g) para secadores mecánicos de media capacidad. En el caso de los sistemas de secado a bajas temperaturas, la energía solar tiene gran potencial como fuente de energía para el secado³⁰.

5.2.1.- Colector de energía solar

Para efectuar el secado con energía solar, se recomiendan los colectores solares planos que no exigen ningún dispositivo mecánico para su funcionamiento. El colector debe de ser fijo y orientado en una dirección norte-sur, con la superficie absorbente volteada hacia el norte. Otro punto importante es que debe inclinarse el colector en un ángulo óptimo que es igual al valor de la latitud del lugar en donde el sistema será instalado³¹. En el cuadro 5.2.1 se muestran las latitudes que abarcan a todo México y algunas ciudades importantes que se encuentran próximas a tales latitudes.

Cuadro 5.2.1.- Latitudes y algunas ciudades de referencia.

Latitud	Ciudades de referencia
16°	Tonalá, Tehuantepec
18°	Villahermosa, Iguala
19°30'	México D.F.
20°	Campeche, Pachuca, Morelia
20°50'	Guadalajara
22°	Tampico, San Luis Potosí, Aguascalientes
24°	Cd. Victoria, Durango, La Paz
26°	Monterrey, Los Mochis
28°	Nuevo Laredo, Guaymas
30°	San Antonio (Texas), Hermosillo
32°	Tijuana



Una ventaja del colector plano (ver figura 5.2.1) es que absorbe la energía directamente del sol, en forma de radiación directa y de energía difusa (radiación reflejada por la tierra y por las nubes). Con un colector plano, es posible, dependiendo del flujo adoptado del aire, incrementar la temperatura del aire hasta en 30°C, en días de cielo descubierto. Un incremento de 5°C es considerado un buen valor para obtener una eficiencia razonable del sistema²⁹. Además el colector plano de energía solar es de construcción relativamente fácil y de costo más bajo que otros tipos de colectores. Eso los convierte en una buena opción para el secado de productos agrícolas.

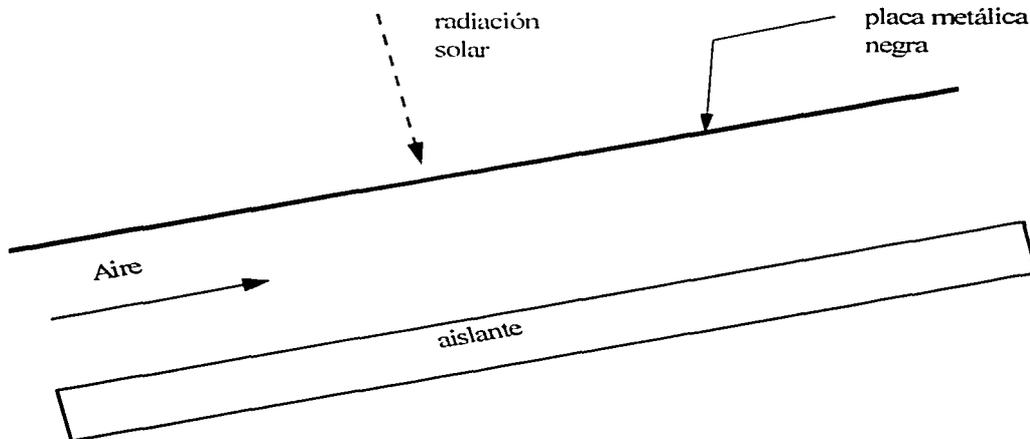
Actualmente existen varios modelos de colectores planos, mas todos ellos poseen dos características básicas:

1. Constan de una placa para absorber energía solar.
2. Circula en contacto con la placa un fluido (normalmente aire del ambiente) para retirar el calor y llevarlo a una pronta utilización en la cámara dónde los granos serán secados.

Un colector de energía solar, con aire como fluido circulante, puede ser construido con una simple capa metálica o de cemento pintada de negro o con materiales más sofisticados. La placa deberá formar un canal con la estructura por donde deberá ser forzado el paso del aire.

Figura 5.2.1.- Colector plano.

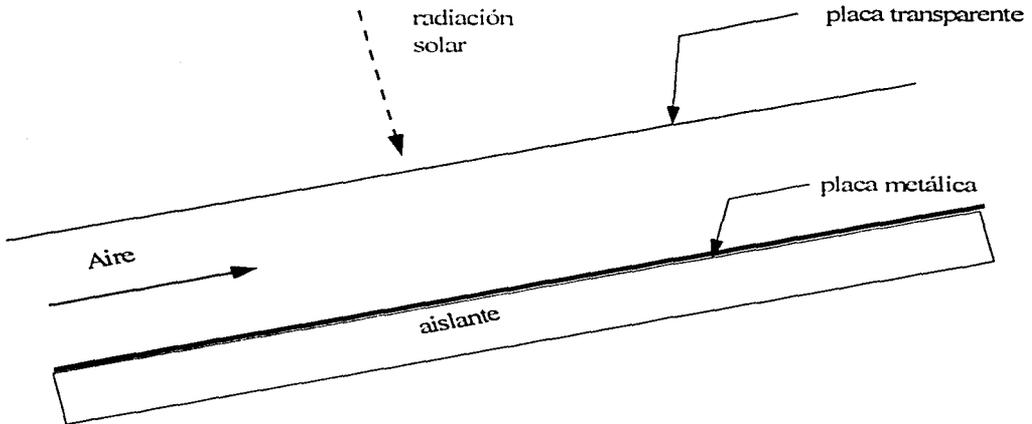
Colector plano



Un segundo tipo (figura 5.2.2) posee además una cobertura transparente sobre la placa colectora con la finalidad de aumentar el rendimiento total del sistema. Esa cobertura puede ser de vidrio o de plástico transparente. La cobertura transparente tiene por finalidad evitar las pérdidas de calor de la placa colectora hacia el ambiente y formar un segundo canal de ventilación para aumentar la superficie de transferencia de calor. Se puede mejorar aún la eficiencia del colector, pero a expensas de una mayor inversión.

Figura 5.2.2.- Colector de placa cubierta.

Colector de plato cubierto



El colector absorbe directamente los rayos del sol a diferentes ángulos de incidencia durante el día ya que son estacionarios. Sin embargo el colector de placa cubierta también absorbe radiación difusa, es decir, la porción de la energía solar filtrada a través de las nubes o que es reflejada por otros objetos.

5.2.2.- Construcción de un colector solar.

Cobertura transparente:

El vidrio es la mejor cobertura para los colectores ya que es bastante transparente a la radiación solar y relativamente opaco a las radiaciones en forma de calor, constituyéndose como un buen aislante del calor colectado por la placa absorbente (este fenómeno es conocido como el efecto invernadero).

El plástico transparente es también bastante usado como cobertura para los colectores. Entretanto, son menos durables que las coberturas de vidrio. Normalmente, la vida útil de una cobertura transparente de plástico no es superior a dos años. El plástico es más transparente a la radiación solar que el vidrio común. Por otro lado, es menos opaco a la radiación en forma de calor. Para el secado a bajas temperaturas las placas de plástico son más convenientes, pues son flexibles, más fáciles de instalar y más baratas que una lámina de vidrio de igual tamaño²⁹.

Placa colectora:

Las características deseables de una placa absorbente son:

- Debe absorber el máximo de radiación solar.
- Debe perder el mínimo de calor hacia el ambiente.
- Debe transferir fácilmente el calor absorbido al aire circulante.

Si la placa es pintada de negro, absorberá más energía radiante que si fuera pintada de otro color. Una superficie oscura podrá absorber alrededor de 95% de radiación que atraviesa la cobertura transparente²⁹. Los materiales más usados como placa cobertora son cobre, aluminio, hierro, cemento y plásticos. De los materiales metálicos, el cobre es el más caro, mas posee la más alta conductividad térmica; mientras que el acero es el más barato pero el de menor conductividad térmica. Por otro lado el cemento es menos caro y es aplicable al secado de granos (es durable y de fácil instalación).

Pérdidas de convección y radiación en la superficie de un plato sin cobertura del colector hacen que sea poco eficiente , colectando menos de 30% de la energía solar que incide en el colector.

La superficie de la placa colectora afecta también la transferencia de calor al aire dentro de los colectores. Algunos tipos son hechos de material corrugado, con la finalidad de aumentar el área de transferencia de calor. Aunque el costo es un factor determinante en la agricultura, el uso de metal corrugado es factible y justificable.

En un colector en donde el área entera de la placa absorbente es barrida por el aire, la conductividad del plato es de poca importancia. Para aplicaciones agrícolas, materiales plásticos e incluso madera

pueden ser usados como platos absorbentes. No tienen la efectividad de los metales, pero son aceptables debido a su menor costo.

Caja protectora:

Metal, fibra de vidrio, concreto o madera pueden ser usados para acondicionar la placa colector y completar el colector. La madera es el material más ligero y fácilmente encontrado en el mercado. Puede adicionarse un aislamiento térmico en el fondo y paredes de la caja protectora para evitar las pérdidas de calor. Sin embargo, la inversión en aislamiento podría ser superior al valor de la energía adicional colectada. El vidrio es el material más utilizado para aislar los colectores solares. Esta parte del colector no será más que una cavidad para que circule el aire que toma el calor absorbido por el plato y lo transfiere en otro punto de uso.

Características de los colectores planos:

Colector sin cobertura transparente:

- incremento de temperatura inferior a 15°C.
- Velocidad máxima del aire dentro del colector ≈ 4.17 m/s.
- espacio entre la placa colector y el fondo de la caja entre 4 y 5 cm.
- material de la placa: cemento o metal pintado de negro.

Colector con cobertura transparente:

- incremento de temperatura hasta de 40°C.
- Velocidad máxima del aire dentro del colector ≈ 4.17 m/s.
- espacio de 2 cm. entre la placa y el fondo del colector y 3 cm. entre la placa y la cobertura transparente.
- material de la placa: cemento o metal pintado de negro.
- material transparente para cobertura: vidrio o plástico.

Los colectores solares remplazarían los calentadores eléctricos a bajas temperaturas, si se provee de 6 a 9 m² de superficie colector por cada 35 m³ de maíz para secar²⁹. Debe compararse el costo comparado

**ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA**

con la eficiencia. Entre más eficiente es un colector, es más costoso. Así, podría resultar económicamente más viable un colector menos eficiente, pero el material siempre debe ser resistente a climas adversos (viento, lluvia), a prueba de corrosión, además de requerir un mínimo de mantenimiento.

5.2.3.- Flujo de aire

La cantidad de calor utilizable colectado del total de la radiación solar incidente en la superficie del colector es afectada por la razón de flujo de aire a través del colector. Si el aire fluye lentamente, se calienta y pierde más calor a su alrededor debido a la diferencia alta de temperatura entre el aire y su entorno. Por otra parte, si el aire fluye muy rápido, podría no tener tiempo suficiente para absorber una cantidad suficiente de calor para que sea utilizable o eficiente. Afortunadamente, pequeños incrementos de temperatura pueden ser efectivamente utilizados para secar los granos, por lo que mover el volumen de aire requerido para el secado a través de los colectores provee ventajas en eficiencia.

Las instalaciones típicas en los Estados Unidos que cobraron auge a principios de la década de los 80's, proveen unos $3.2 \text{ m}^3/\text{min.t}$ de aire, utilizado para secar granos, y con un aumento de unos 5°C con respecto al ambiente, dependiendo del clima⁴².

5.2.4.- Perspectivas del secado con energía solar

La energía solar parece ser gratuita, pero coleccionar, almacenar y distribuirla puede tornarla más cara que cualquier otra forma de energía. Su adaptación para el secado de productos agrícolas podría abatir los gastos en energía destinada al proceso de producción, que en algunos casos son mayores al 50% del total de gastos que se realizan en la cosecha de granos.

En algunas regiones algunos productos agrícolas pueden ser secados hasta alcanzar una humedad segura para el almacenamiento (13%) con el uso de aire en condiciones ambientales. Cualquier cantidad de calor adicionado al aire de secado reduce la humedad relativa y puede causar un sobreseca del producto, principalmente en las capas inferiores del silo. Aunque los granos

sobresecados pueden ser rehumedecidos con subsecuente ventilación, secado y humidificación alternados pueden generar gran cantidad de granos quebrados. Normalmente se mezclan en estos casos los granos húmedos con los más secos para minimizar el gradiente de humedades dentro del lote. En las regiones húmedas, es necesario administrar calor adicional para reducir la humedad relativa del aire y permitir el secado de granos hasta valores de humedad adecuados para el almacenamiento. En estas áreas, el calor proporcionado por la radiación solar puede ser una opción.

La energía solar colectada por un plato puede ser una práctica y económica fuente de calor para el secado de granos. Los sistemas solares de secado también funcionan bien cuando se usan en combinación con otros métodos, i.e., el secado solar puede ser usado para completar el secado de granos con una reducción parcial de su humedad.

En conclusión, se puede afirmar que, a medida que las fuentes alternativas de energía se vuelvan más atractivas y/o necesarias, los incentivos para la instalación de sistemas solares de secado serán mayores. El secado de granos con energía solar puede ser un alternativa atractiva tecnológica y económicamente.

Una vez secado el grano, este debe de ser guardado bajo condiciones que favorezcan su conservación. En el silo solar hexagonal, el mantenimiento de la calidad del maíz se fundamenta en el control de la temperatura y del microclima que en él se crea, mediante la aireación, que aprovecha el mismo sistema de secado.

CAPÍTULO VI

ALMACENAMIENTO CON AIREACIÓN

Todo almacén debe proteger a los granos de la excesiva humedad, de la intemperie y de las temperaturas favorables al desarrollo de agentes patógenos y de deterioro. Debe ser a prueba de lluvia y plagas, y preferentemente debe contar con un sistema de aireación para el control de la humedad y la temperatura. Además los almacenes más grandes deben ofrecer facilidades de limpieza, transporte y aplicación de medidas protectoras.

El objetivo del almacenamiento es preservar las principales características de calidad de los granos, para mantener sus funcionalidades tecnológicas y su valor nutricional y sanitario al nivel más alto posible. Para tal efecto, el grano que se almacena debe de encontrarse en condiciones óptimas: seco, sin materia extraña, ni granos quebrados, y libre de plagas.

El propósito del almacenamiento, conservar la calidad inicial del grano (dado que no es posible mejorarla), no dura eternamente, según las condiciones iniciales de este se almacenará máximo cierto tiempo. Aunque el grano que se va a guardar se encuentre en buenas condiciones, no debe de ser olvidado en el almacén. A lo largo del almacenamiento el grano debe de ser monitoreado y muestreado para prevenir y detectar cualquier problema. Una forma de asegurar el mantenimiento de la calidad de los granos es el uso de la aireación.

6.1.- AIREACIÓN DE LOS GRANOS

La aireación no es una técnica muy reciente, pues desde 1793 ya se tenían noticias de sistemas de aireación dotados de fuelles acondicionados por "molinos de viento". El desarrollo moderno en aireación empezó después de la segunda guerra mundial, al encontrarse algunos países con sobreproducciones de grano que había que guardar por más de un año. Avances adicionales se llevaron a cabo con el advenimiento del almacén en campo y se incrementaron con el uso del aire caliente para el secado³¹. Hoy es utilizada en todo el mundo, principalmente en los Estados Unidos, los países

europcos, Australia, Israel y Argentina. En los paíscs en desarrollo aún se puede considerar como muy reciente el uso de la aireación y como una práctica común el "transilaje", que tiene el mismo objetivo de la aireación¹⁷.

En el pasado, periódicamente se movían los granos de un almacén a otro para que el aire pasara por el grano y así mantener la calidad comercial del producto, gracias a la disminución y control de su temperatura eliminando zonas que acumulan calor. El transilaje resuelve parcialmente el problema de exceso y falta de uniformidad de la temperatura, ya que la reducción de la temperatura es pequeña, y son necesarias varias operaciones de transilaje para que ocurra una disminución significativa de la misma. La energía gastada, los daños y pérdidas provocados por el movimiento del producto (quiebre de granos, aumento del número de granos rotos, generación de tamo), el desgaste del equipo, el espacio extra requerido, y el tiempo necesario para ejecutar la operación, son algunos de los factores que ponen en desventaja al transilaje en comparación con la aireación¹⁷.

El maíz secado artificialmente era mucho más frágil que el que se secaba naturalmente, y su movimiento resultaba en un quiebramiento excesivo. Para reducir la manipulación, el movimiento fue reemplazado por la aireación³¹.

Hoy en día la aireación, que mueve el aire a través de la masa de granos, se acepta como una técnica de conservación de la calidad de los granos almacenados. Sin duda, el almacenamiento a granel por un período de tiempo prolongado (más de algunas semanas), es impracticable sin un sistema de aireación bien proyectado y adecuadamente manejado.

6.1.1.- Importancia de la aireación

En general, en los países en desarrollo, por ser la aireación una técnica que está siendo aplicada desde hace pocos años, hay una concepción del uso del sistema como herramienta para la solución de problemas de calentamiento de los granos; esto es, uso de la aireación como técnica correctiva. Debe comprenderse que la aireación es una técnica de conservación que debe aplicarse como medida preventiva. La aireación ocurre durante el almacenamiento de grano seco, con un contenido de

humedad seguro para su almacén. La aireación normalmente no involucra un movimiento suficiente de aire como para secar el grano¹⁷.

En aireación de granos, los gastos de aire utilizados son muy pequeños y, en consecuencia, el proceso de enfriamiento y uniformación de la temperatura de la masa de granos es bastante lento, exigiendo muchas horas para realizarse plenamente. Además, es importante que el aire del ambiente que va a ser forzado a través de la masa, esté en condiciones adecuadas de temperatura y humedad para que se puedan aprovechar todos los beneficios que la técnica ofrece³².

Los principales objetivos de la aireación son disminuir y uniformar la temperatura y mantenerla lo más baja que se pueda, para así propiciar condiciones favorables para la conservación de la calidad del producto durante un período de tiempo prolongado. Se busca también prevenir la migración y condensación de humedad dentro del silo³², aunque también se obtienen otros beneficios que se discutirán más adelante.

6.1.2.- Estructura del sistema

El sistema de aireación, en general, está formado por los siguientes elementos³¹:

- Un dispositivo para mover y forzar el paso del aire a través de la masa de granos (ventilador)
- Ductos de alimentación del aire
- Ductos de distribución del aire

Estos elementos son los mismos que se utilizan para el secado en el silo. Es importante que el ventilador sea de gasto regulable, pues en la aireación los gastos empleados son de 10 a 50 veces menores a los que se aplican en el secado.

Las principales consideraciones en el diseño de sistemas de aireación son³¹:

- Flujo de aire requerido
- Selección del ventilador (según la potencia y consumo de energía)
- Distribución del aire

El gasto de aire que se recomienda en la aireación depende del tipo de grano, el tamaño y tipo de almacén y las condiciones climáticas. En el cuadro 6.1.1 se muestran los gastos utilizados normalmente en los EUA.

Cuadro 6.1.1.- Gastos de aire (m³/min.t) recomendados para la aireación de granos en los EU.

Humedad % b.h.	Tipo de almacén	Estados del norte	Estados del sur
12-15	Plano	0.054 - 0.107	0.071 - 0.107
12-15	Elevado	0.027 - 0.054	0.036 - 0.107

Fuente: Sauer D.B. (editor). 1992. *Storage of cereal grains and their products*. 4a edición, American Association of Cereal Chemists Inc., St. Paul, Minnesota, USA, pp.228.

Humedad % b.h.	clima templado	clima subtropical
13 - 15	0.02 - 0.06	0.05 - 0.10

Fuente: Brooker D.B., Bakker-Arkema F.W., Hall C.W. 1992. *Drying and storage of grains and oilseeds*. AVI Publishing Co., USA, pp.401.

En silos se emplea generalmente un flujo de 0.05 m³/min.t. Las restricciones de poder del ventilador limitan al maíz alturas no mayores de 15m.-es decir celdas del silo hexagonal de capacidad no mayor a 1000 ton.- y flujos máximos de 0.5 m³/min.t.¹² Los flujos recomendados van de 0.05 a 0.25 m³/min.t.

Cuando el clima es más cálido, normalmente el gasto de aire es mayor. El grano se enfría más rápido a mayor gasto, pero se requiere un considerable aumento de energía. Para la selección del gasto de aire los siguientes puntos deben tomarse en cuenta¹²:

- Es deseable que el grano alcance una temperatura con una diferencia no mayor a 4°C con respecto al ambiente en un tiempo de 15 a 20 días.
- Un período conveniente de aireación es 10 horas por día.
- El sistema de aireación debe operarse tan pronto como haya grano en el silo, aunque no se haya llenado.
- Debe escogerse el menor gasto de aire posible con el fin de ahorrar energía.

Selección del ventilador:

La selección del ventilador se basa en el flujo de aire, el tipo de grano y la altura del grano. Estos tres factores determinan la resistencia del grano al flujo y las presiones estáticas contra las que el ventilador debe proporcionar el flujo requerido. Se pueden emplear para la aireación ventiladores axiales o centrífugos.

Los requerimientos en caballos de fuerza y la presión estática para la operación del ventilador de aireación de maíz se muestran en el cuadro 6.1.2. Los datos son válidos para grano limpio.

Cuadro 6.1.2.- Caballos de fuerza requeridos y presión estática para la operación del ventilador de aireación de maíz, a diferentes profundidades de grano y flujos de aire.

profundidad de grano (m)	HP requeridos por ton a diferentes flujos de aire			Presión estática (mm de H ₂ O)		
	0.25 m ³ /min.t	0.10 m ³ /min.t	0.05 m ³ /min.t	0.25 m ³ /min.t	0.10 m ³ /min.t	0.05 m ³ /min.t
3 - 4.5	0.0016	0.0008	0.0004	15.2	14.0	13.0
6	0.0020	0.0008	0.0004	17.8	16.5	14.5
7.5	0.0024	0.0012	0.0004	25.4	19.6	16.0

Fuente: Talbot M.L. 1993. *Management of stored grains with aeration*. Circular 1104, Agricultural Engineering Department, Florida Cooperative Extension Service, Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida, USA, pp 3.

Sistema de distribución:

El aire debe de alcanzar todas las áreas del grano almacenado antes de que ocurra condensación de humedad, y sobretodo en la parte superior del silo y cerca de las paredes. Una aireación satisfactoria depende primariamente del gasto de aire³². La razón de flujo de aire que atraviesa el grano no siempre es uniforme en todo el silo, por lo que la razón de flujo es un valor promedio, y debe ser suficientemente alto para que el aire alcance todas las zonas del silo.

Calendario de aireación:

La humedad relativa promedio del aire generalmente se encuentra por debajo de la HRE (humedad relativa de equilibrio) con el grano a un nivel de humedad seguro para el almacenamiento. Bajo condiciones promedio del clima, el grano puede ser aireado continuamente sin aumento indeseable de humedad, aunque eso debe verificarse para cada localidad³³.

Los granos deben airearse tan pronto como sean introducidos en el almacén para remover calor de la cosecha o del secado. La temperatura debe ser reducida si es posible a 20°C. El grano cosechado en verano deberá airearse en meses más fríos (otoño-invierno) para reducir su temperatura³². Como el grano es un organismo vivo y además difícilmente se encuentra estéril, siempre habrá calentamiento como consecuencia de la actividad biológica, por lo que siempre será necesaria la aireación periódica.

Aire frío y relativamente seco normalmente sigue después de las lluvias. Este es el mejor momento para airear, y si el buen clima continúa lo suficiente, el grano puede enfriarse a temperaturas por debajo del promedio estacional³².

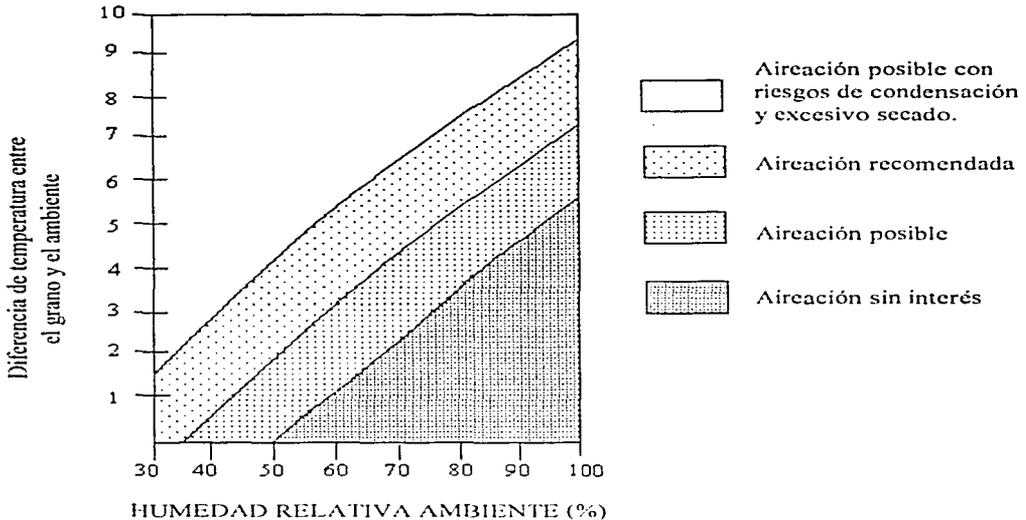
Debe airearse el grano cuando la temperatura del aire ambiental se encuentra al menos 5°C por debajo de la temperatura del grano, y cuando esta excede los 15°C³². Es mejor airear el grano con aire que no cause cambios en el contenido de humedad, aunque el flujo de aire utilizado normalmente es suficientemente bajo como para sólo permitir cambios graduales y pequeños en la humedad del grano. Aireación continua con 0.02 a 0.06 m³/min.t de flujo, aún con clima lluvioso, no cambiará apreciablemente el contenido de humedad del grano. Como regla general, ocurrirá leve humedecimiento del grano cuando³²:

1. el aire exterior es 5°C o más , más frío que el grano.
2. no hay aireación en períodos de alta humedad.

Durante períodos cálidos, debe airearse cuando la temperatura es menor, es decir al caer la noche, o temprano en la mañana. Airear el grano algunas horas cada semana después de haber alcanzado la temperatura deseada, elimina olores indeseables y se recomienda como medida preventiva¹⁷.

Una guía útil para saber cuándo es conveniente o no airear es la siguiente figura.

Figura 6.1.1.- Guía simple para la aireación.



Fuente: Arias C. 1993. *Manual de manejo poscosecha de granos a nivel rural*. Oficina Regional de la FAO para América Latina y el Caribe. Santiago, Chile, pp 3-12, del "Institut Technique des Céréales et des Fourrages", Paris, Francia.

Si la diferencia de temperatura entre el grano y el ambiente es menor a 3°C, la aireación no tiene caso, y si es mayor a 7°C, puede ocurrir secado o condensación local de humedad. A mayor humedad relativa del aire ambiente, la diferencia de temperatura debe ser mayor para que la aireación sea recomendable.

Algunos autores también recomiendan tiempos de aireación según la época del año, como se muestra en el cuadro 6.1.3.

Cuadro 6.1.3.- Tiempo de aireación (horas) en diferentes épocas del año y gastos de aire.

Estación	gasto de aire m ³ /min.t		
	0.05	0.10	0.25
Primavera	240	120	48
Otoño	300	150	60

Fuente: Brooker D. B., Bakker-Arkema F.W., Hall C.W. 1992. *Drying and storage of grains and oilseeds*. AVI Publishing Co., USA, pp 395.

Pueden tomarse los valores anteriores como referencia, pero también es posible calcular el tiempo de aireación fácilmente conociendo algunos datos, como se explicará más adelante.

6.1.3.- Problemas a considerar en la aireación

Deterioro del producto:

El deterioro de los granos almacenados es un proceso complejo. Normalmente es un proceso lento y al principio poco perceptible. Sin embargo, puede ser rápido si las variables que influyen en el mismo están correctamente combinadas; esto es, si las variables físicas (temperatura), químicas (oxígeno, gas carbónico, humedad, compuestos orgánicos subproductos de la actividad biológica) y biológicas (microorganismos, insectos, roedores) son favorables a la actividad biológica del grano y de los otros organismos vivos que habitan en el medio ecológico creado en la masa de granos¹⁷.

Condensación de la humedad

La condensación de la humedad ocurre cuando una masa de aire caliente encuentra una superficie con menor temperatura lo que propicia que la temperatura del aire disminuya hasta llegar al punto de rocío. Este fenómeno es muy importante en el almacenamiento de los granos.

El calentamiento diurno de la lámina de la pared del techo de los silos hace que la temperatura del aire, en el espacio intergranular próximo a la pared, suba. Lo mismo pasa con el aire que está sobre la capa superior de los granos. El aire caliente tiene mayor capacidad de mantener vapor de agua, y como éste está en contacto con el grano, la humedad del grano se evapora y el aire queda, por lo tanto, caliente y

húmedo. Con la disminución de la temperatura durante la noche, la temperatura del aire en esos espacios también irá disminuyendo hasta alcanzar temperaturas bajo el punto de rocío, ocurriendo entonces la condensación de la humedad. La posibilidad de que el aire se condense en los silos de concreto es menor que en los silos metálicos¹⁷.

6.1.4.- Beneficios de la aireación

-Enfriamiento de la masa de granos

El enfriamiento de la masa de granos es el principal y más ventajoso beneficio de la aireación. Como todos los alimentos, los granos también se benefician del almacén a bajas temperaturas, las que reducen el desarrollo de hongos y pueden inhibir la infestación por insectos.

Si el aire ambiente es adecuado para el proceso (con una temperatura suficientemente baja), el enfriamiento traerá beneficios para la conservación del grano almacenado. Al disminuir la temperatura de los granos, disminuye también la actividad de agua; esto es, disminuye la disponibilidad de agua para actividades biológicas tanto de los granos como de la microflora presente. Asimismo, la disminución de la temperatura retardará o hasta inhibirá (dependiendo de la temperatura alcanzada con el enfriamiento) el desarrollo de los insectos. La temperatura es además un factor que influye en la respiración de los granos; cuanto menor es, menor es la velocidad de respiración y, por lo tanto, menor la producción de calor. Al existir una variedad de hongos de almacén sus temperaturas óptimas varían entre 23°C y 40°C. El calor generado por la respiración de los hongos y otros microorganismos de almacén incrementa la temperatura del grano a medida que estos se desarrollan. Este efecto puede prevenirse con una aireación adecuada³³.

El calentamiento de los granos en una determinada parte del silo puede deberse al ataque de insectos o al crecimiento de hongos debido a que el secado fue insuficiente. La masa de granos tiene un bajo coeficiente de conducción de calor. Las pequeñas cantidades de calor, que se generan por el desarrollo de insectos o el crecimiento de hongos en los granos, no se disipan rápidamente y permanecen en la masa como "bolsa de calor". El aumento de temperatura se propaga lentamente hacia la periferia de la bolsa de calor, lo que produce diferencias de temperatura, causando un movimiento del aire caliente del

foco hacia la superficie de los granos. Si la temperatura del grano de la superficie o del aire exterior es suficientemente baja se condensa la humedad, ocasionando un incremento de la humedad del grano y su deterioro. Problemas de este tipo pueden ser prevenidos con la aireación¹⁷.

Si se lograra mantener una temperatura al interior del silo menor a 5°C se inhibiría la actividad de casi cualquier organismo vivo, pero eso sería considerar prácticamente temperaturas de refrigeración que solo podrían alcanzarse en zonas y épocas determinadas (al norte del país o zonas montañosas en invierno). Se considera adecuada una temperatura menor a 15°C, con la que se controla el desarrollo de insectos.

El establecimiento de un programa mensual de aireación preventiva, para mantener la masa de granos a una temperatura baja, hará que los daños del grano sean mínimos³³.

-Remoción de olores:

Olor a humedad o a "moho", olores causados por malfuncionamiento del secado, y aquellos asociados con el uso de preservativos químicos de granos pueden ser eliminados o reducidos en intensidad con la aireación. Olores a ácido o a "fermentado" relacionados con el uso de ácidos orgánicos como preservativos son casi completamente removidos con la aireación³¹.

-Cambiar o homogeneizar la humedad del grano:

En algunos casos se llega a almacenar grano sobre-secado, el cual algunos intermediarios rehumedecen lo cual es una práctica incorrecta y castigada por la legislación. Sin embargo, la adición de humedad durante la aireación no es factible³¹.

Los gastos de aire establecidos para airear cambian la temperatura en un tiempo razonable (1 semana o 10 días). La zona de cambio de temperatura pasa a través del silo unas 20 o 30 veces más rápido que la zona de secado o humidificación que le seguiría. A pesar de que un gasto de aire para airear de 0.1 m³/min.t es adecuado para completar un cambio de temperatura en una semana, podría tomar seis meses en completar un cambio de humedad a través de un mismo lote. Así, para transferir humedad al grano en un tiempo razonable, el gasto de aire debe ser mucho mayor³¹.

Cuando lotes de grano con diferentes contenidos de humedad se almacenan juntos, la aireación normalmente efectúa la transferencia y homogeneización de la humedad.

Cuando el clima exterior al silo es más caliente o más frío que el de su interior, se produce un migración de la humedad a través de los granos debido al diferencial de temperatura que se crea entre los granos más cercanos a las paredes y los que están más alejados. Esto genera movimientos de aire que provocan zonas de condensación de humedad. Es posible prevenir la migración de humedad disminuyendo el diferencial de temperatura de la masa de granos con el uso de la aireación.

-Aplicación de fumigante:

Gracias a un sistema de aireación se permite la aplicación de fumigante y su distribución a través del grano en silos.

-Mantener la humedad del grano:

Esto es sólo una opción en caso de cosechar el grano durante un clima frío (menos de 15°C), de tal forma que se puede almacenar a humedades mayores (16-18°C)³¹.

6.2.- AIREACIÓN EN EL SILO

La aireación consiste básicamente en un proceso de transferencia de calor: el calor que pierde el grano es el calor que gana el aire:

$$G_a \rho_a C_a \Delta T_a t = W_g C_g \Delta T_g \quad (6-1)$$

Donde

G_a : gasto de aire en m³/min

ρ_a : densidad del aire kg/m³ (se calcula con la ecuación $\rho = P/RT$)

C_a : capacidad calorífica del aire, 1.005 kJ/kg°C

ΔT_a : diferencia de temperatura del aire en °C

t : tiempo en min.

W_g : peso de grano en kg

C_g : capacidad calorífica del grano en kJ/kg°C, varía entre 1.85 y 1.95 a humedades entre 12 y 14% b.h.

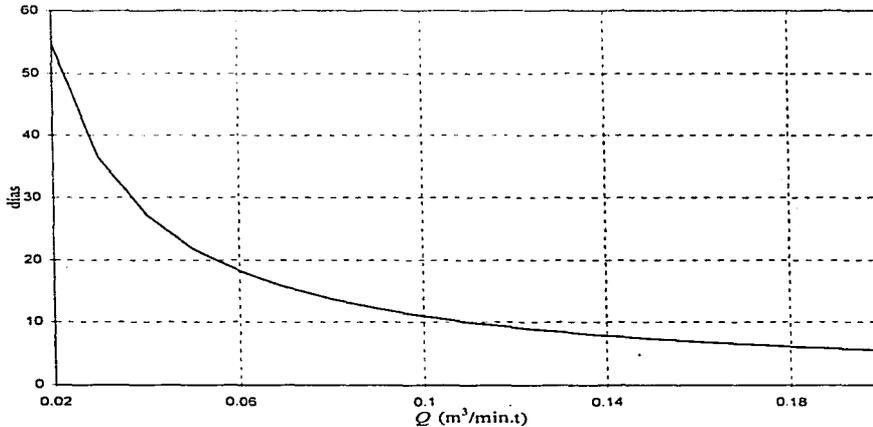
ΔT_g : diferencia de temperatura del grano en °C.

Despejando t y cambiando G_a por Q (gasto por unidad de masa de grano), se elimina el término W_g :

$$t = \frac{1000C_g}{Q\rho_a C_a} \quad (6-2) \quad (Q \text{ se expresa en m}^3/\text{min.t})$$

Como C_g , C_a y ρ_a son constantes, el tiempo de aireación es simplemente una función inversa del gasto que se utilice, como se ve en la gráfica 6.2.1

Gráfica 6.2.1.- Tiempo de aireación en función del gasto de aire.



Gastos menores a $0.05 \text{ m}^3/\text{min.t}$ resultarán en tiempos demasiado prolongados. Obviamente a mayor gasto menor es el tiempo necesario para completar la aireación, pero a partir de $0.1 \text{ m}^3/\text{min.t}$ el aumento del gasto no resultará en un ahorro significativo de tiempo, pero sí lo será el gasto de energía ya que se requeriría un ventilador más potente.

6.3.- CONTROL INTEGRAL DE LOS SISTEMAS DE SECADO Y AIREACIÓN

El control del sistema de secado y de aireación del silo tiene por objetivos alcanzar un contenido de humedad final uniforme, maximizando la capacidad del sistema bajo condiciones aceptables de deterioro de la calidad del grano y de consumo de energía³⁴. El control en el silo se basaría en controlar la operación del ventilador, con lo que se evitaría sobresecar el grano, gastar energía extra, y generar grano susceptible a quebrarse, problemas que son costosos.

Generalmente el control del secado y la aireación se basa en la experiencia del operador, aunque ya existen en los países desarrollados controles automatizados, que se basan en la medición de la temperatura y humedad relativa del aire ambiental y la temperatura del grano³⁴.

Los criterios más importantes del control son:

- Pérdida de materia seca.
- Consumo de energía
- Sobresecamiento.

Las estrategias comúnmente aplicadas al control se basan en:

- Control de la humedad relativa con un límite superior.
- Control de la humedad relativa con límites inferior y superior.
- Operación del ventilador basada en la HRE del grano, y en un auto-ajuste del mínimo número de horas de operación diaria del ventilador, dependiendo de la fecha.
- Operación del sistema basada en límites de HRE y temperatura del grano.

Los resultados de una estrategia de control para el secado y la aireación de granos en el silo depende de la localidad en donde se prueba y no pueden ser generalizados. Instalar controles automáticos en el silo representaría seguramente ventajas con respecto a la calidad del grano y los costos de operación. Además, se requeriría menos experiencia del operador y menos pérdida de materia seca ocurriría³⁴.

La aireación es una estrategia muy conveniente para asegurar el mantenimiento de la calidad de los granos pero no es la única. Otros métodos de conservación se han venido estudiando y aplicando, según el destino del producto y la calidad final deseada, e incluso pueden prescindir del secado o la aireación.

FALTA PAGINA

No. 95

CAPÍTULO VII

ALTERNATIVAS DE ALMACENAMIENTO

El método más conocido y usado para la prevención del deterioro de granos durante el almacenamiento es el secado. El bajo contenido de humedad es un objetivo difícil, costoso y no siempre deseable, y en algunos casos en granos secos con humedades de 14% son suficientes para el desarrollo de hongos de almacenamiento.

Para muchos el secado de los granos es indeseable o incosteable, por lo que se han desarrollado alternativas de almacenamiento, sin que el secado sea estrictamente necesario. Cuando este se evita, se obtienen algunas ventajas: se reduce la susceptibilidad a daño mecánico, se mejora la calidad nutricional, se minimiza el manejo del grano, y se elimina la necesidad de contar con equipo de secado, principalmente. Pero es obvio que la alternativa que se adopte debe de ser igualmente o más eficaz en la preservación del grano que los métodos tradicionales. De ahí la aplicación de atmósferas controladas o los tratamientos químicos, que posibilitan la conservación del producto aún con altos contenidos de humedad¹⁴. Otros métodos como la refrigeración, buscan prolongar la vida de anaquel, pero son complementarios al secado.

7.1.- ALMACENAMIENTO HERMÉTICO Y CON ATMÓSFERA CONTROLADA

Al sellar un silo, normalmente se elimina la atmósfera interna y se reemplaza por un gas inerte como CO_2 o N_2 . También es posible crear vacío parcial en el silo con la ayuda de una bomba. Este método pone rápidamente al grano en condiciones parciales de anoxia (ausencia de O_2), entonces se inhiben los procesos respiratorios y se induce la muerte gradual de insectos y hongos. Así, el stock se "esteriliza" progresivamente y su conservación se asegura, sin la necesidad de usar preservativos químicos. Fungicidas o bacteriostáticos como el ácido propiónico, insecticidas y fumigación son entonces innecesarios³⁶.

El almacenamiento hermético parece entonces muy conveniente, especialmente si se considera que también los pájaros y roedores son eliminados. Además la ausencia de O_2 elimina el fenómeno de oxidación y por lo tanto disminuye el riesgo de enranciamiento así como el riesgo de calentamiento natural, incendio o explosión,

problemas graves en atmósferas oxigenadas. Los granos son también completamente libres de residuos químicos y pesticidas y todos los riesgos inherentes a la fumigación son evitados.

Si este atractivo método no se ha popularizado es porque, desafortunadamente, la tecnología de silos herméticos no es sencilla, y presenta diversos problemas, sobretodo en el caso de grandes volúmenes¹⁷.

Los contenedores pueden ser metálicos, de fibra de vidrio, o concreto, cuyos problemas son en general la hermeticidad y/o el costo. Otros inconvenientes son la acumulación de humedad en ciertas zonas por falta de ventilación, el vaciado parcial del silo sin que se modifique la atmósfera interna, y la pérdida de viabilidad de las semillas¹⁷.

7.2.- ALMACENAMIENTO DE GRANOS CON ALTA HUMEDAD

Los cereales son cosechados cuando alcanzan su máximo peso seco, lo que ocurre cuando tienen un 30% de humedad, por lo que el producto.

Otra alternativa al costoso secado de granos es su almacenamiento con un alto contenido de humedad, condición que los hace mejor alimento como forraje que el maíz seco. Es decir que con menor cantidad de grano se produciría la misma cantidad de carne, aunque el aumento de la eficiencia nutritiva no es mayor del 10% siendo en promedio de 6%³⁵.

Se puede almacenar maíz con alto contenido de humedad de dos formas: ensilado en el almacén, o tratado con ácido previamente al almacenamiento.

Para el ensilaje la humedad debe encontrarse entre 23 y 35% (óptimo de 28%). Una menor humedad representa riesgo de combustión. Para el grano tratado con ácido la humedad debe encontrarse entre 18 y 27%. Un inconveniente es el espacio que ocupa el maíz húmedo, pues sólo el 88% del mismo maíz seco puede ser almacenado en ese mismo volumen.

El principio del almacenamiento de granos con alta humedad es el pH bajo. El aumento de acidez previene el crecimiento de hongos o ciertos microorganismos. El pH para el grano almacenado con alta humedad debe ser de 3.8 a 5, preferentemente cercano a 3.8. La reducción del pH puede ser obtenida de dos formas: 1) por fermentación, que causa una disminución natural del pH del grano y 2) agregando ácido, que ocasiona un incremento artificial de acidez al mismo tiempo que se almacena el grano.

Ensilaje: la fermentación ocurre en tres fases:

1. Se consume rápidamente el O₂ por respiración del grano y microorganismos presentes. Es una fase corta que dura de 5 horas a 2 días.
2. Se inician procesos de fermentación de azúcares y almidón para producir ácidos orgánicos. La producción gradual de ácidos ocasiona finalmente la disminución de los procesos de fermentación.
3. El pH cae a alrededor de 4, suficientemente bajo para preservar el grano.

El ensilaje dura en su totalidad tres semanas, perdiéndose sólo 4% de la energía calórica debido a la conversión de carbohidratos a otros productos. Este proceso agrega valor agregado al producto pues el grano es parcialmente pre-digerido antes del consumo por animales. Por su parte el valor nutritivo aumenta de 8 a 15% con respecto a grano no ensilado³⁵.

El almacén para este producto debe ser sellado, sino deben usarse cubiertas plásticas para impedir el paso de aire. Se debe remover unas dos pulgadas diarias de la parte superior del grano expuestas al aire. Además es importante que se consuma el grano en no más de 8 horas después de ser sacado del silo.

Tratamiento con ácido: el ácido aplicado al grano elimina e inhibe el desarrollo de hongos y microorganismos relacionados, y su efecto continúa casi indefinidamente. El embrión del grano muere, por lo que no hay respiración u otra actividad biológica. Aunque el modo de acción no se conoce con certeza, la preservación se asocia al bajo pH del grano tratado, aunque algunos ácidos no son efectivos aún alcanzando niveles de pH igual de bajos³⁵.

Los mejores inhibidores, considerando eficiencia, costo y seguridad, son el ácido propiónico y compuestos relacionados como isobutiratos, propionato de sodio y sorbato de potasio, aunque las sales son menos efectivas

que los ácidos. En el mercado es común encontrar ácido propiónico mezclado con otros ácidos, principalmente acético³⁵. La cantidad de ácido a aplicar depende del tipo de ácido y de la humedad del grano (ver cuadro 7.2.1).

Cuadro 7.2.1.- Ácido propiónico requerido para la prevención del crecimiento de hongos en grano de alto contenido de humedad.

Contenido de humedad %	Acido propiónico requerido	
	%	lb / ton
18	0.3-0.6	6-12
22	0.5-0.8	10-16
26	0.6-1.0	12-20
30	0.8-1.2	16-24

Fuente: Talbot M.T. 1985. *High Moisture Grain Storage*. Bulletin 225, Florida Cooperative Extension Service, University of Florida, Gainesville, USA, pp9.

El método usual de aplicación del ácido es rociar el grano en movimiento hacia la alimentación del silo. Una aplicación adecuada es esencial; aplicar demasiado ácido incrementa el costo del tratamiento, y aplicar poco puede resultar en el deterioro del producto. También es importante que todo el grano haya sido tratado, pues una porción de grano no tratado puede causar extensión del deterioro. La clave de un almacenamiento exitoso de grano húmedo es la aplicación de ácido suficiente y uniforme sobre el grano.

El grano tratado puede guardarse en cualquier tipo de almacén, aunque el ácido puede corroer ciertos materiales, especialmente en climas cálidos. Puede dejarse incluso en almacén a la intemperie si no hay clima lluvioso. Se recomienda airear el producto para evitar migración y condensación de humedad, y monitoreando periódicamente¹⁸.

Seguridad: Aunque los ácidos orgánicos son ácidos débiles, son corrosivos y requieren ser manejados con cuidado: debe evitarse el contacto con ojos y piel, al ser utilizados se debe contar con las protecciones indicadas (guantes, lentes, bata, etc.). También debe evitarse inhalación y el contacto con el grano tratado.

Ventajas: Se considera la mayor ventaja de los preservativos químicos al hecho de que se emplea muy poca energía para tratar a los granos, por lo que el productor no depende de la disponibilidad de combustible para almacenar con éxito sus cosechas.

El costo de los aplicadores de ácido es mucho menor que cualquier secador de granos, entonces el productor debe invertir poco en conservación, y además ya no debe planificar la cosecha en función de la capacidad de secado.

Desventajas: Son tres las principales desventajas del tratamiento con ácido:

- **Marketing:** el grano tratado ya no puede introducirse en los canales convencionales de mercado, debe utilizarse como forraje. No puede usarse como semilla pues pierde su capacidad germinativa, no puede usarse como alimento para humanos ni tampoco secarse y venderse como maíz comercial.
- **Corrosión de equipo:** el ácido es capaz de corroer metales e incluso concreto, por lo que reduce la vida útil de los sistemas de almacenamiento.
- **Costo:** el costo de aplicación depende de varios factores como la humedad inicial del grano, la duración del almacenamiento, el precio del ácido, y la cantidad de grano a tratar. Este método es relativamente más caro que los métodos tradicionales de secado y almacenaje. Pero la selección del tratamiento con ácido debe basarse en otros factores ajenos al costo, como la conveniencia, velocidad y facilidad de manejo, flexibilidad de la inversión, la preferencia (además de la mayor eficiencia nutritiva) de la alimentación animal con maíz de alta humedad, y los requerimientos bajos de capital inicial.

Cualquiera que sea el método escogido para conservar el grano, este será aplicable en el silo solar hexagonal, el cual deberá contar con las adaptaciones pertinentes.

CAPÍTULO VIII

EVALUACIÓN DEL SECADO EN EL SILO

8.1.- EVALUACIÓN TEÓRICA

Una forma sencilla y representativa de predecir cómo ocurre el secado en el silo es utilizando ecuaciones simples de balance de materia y energía, y volviendo constantes algunas variables que en él intervienen. A continuación se explican y justifican las suposiciones hechas para los cálculos.

El secado se efectúa en la realidad con aire ligeramente calentado (no más de 15°C) por colectores solares, durante el día obviamente. Durante la noche, aunque el aire del ambiente tiene una mayor humedad relativa, el secado del grano puede ocurrir, pero a mayor costo pues se mantiene funcionando el ventilador y además el secado es menos eficiente que en el día. Claro que por otra parte secar el grano durante la noche reduce el tiempo total de secado y por lo tanto el riesgo de deterioro.

Se han realizado diversos estudios avocados a encontrar expresiones matemáticas que simulen de manera precisa el secado de los granos a través del tiempo, basadas en teorías de difusión, convección o en modelos como el de "capa delgada". Pero su complejidad no siempre implica mejor precisión, en cambio, es posible hacer buenas aproximaciones de forma más sencilla, mediante la ecuación de balance de calor:

$$t G C_a (T_a - T_g) = h M S (M_o - M_e) v \quad (8-1)$$

A continuación se explica el significado de cada miembro de la ecuación.

t: tiempo que tarda el grano en secarse de *M_o* a *M_e*.

G: gasto volumétrico de aire proporcionado al silo por el ventilador.

C_a: calor específico del aire seco, el cual proporciona el calor necesario para evaporar agua de la superficie del grano.

T_a: temperatura del aire a la entrada del silo.

T_g: temperatura del grano en el silo, generalmente la misma que la temperatura ambiente.

h: calor latente de vaporización del agua en el grano, depende del tipo de grano, la temperatura y la humedad, pero en cualquier caso es del orden de 2400-2500 kJ/kg., y para fines prácticos se usa un valor constante a pesar de que varíe durante el secado.

MS: es el peso de materia seca del grano.

Mo: humedad inicial del grano.

Me: humedad de equilibrio (con las condiciones de entrada del aire) o humedad final promedio, se obtiene con la ecuación de Chung. Generalmente no se seca el grano hasta la humedad de equilibrio, porque significaría sobresecarlo. Lo normal es que se detenga el secado cuando el grano alcanza una humedad promedio segura para el almacenamiento.

Pero lo anterior no quiere decir que todo el grano contiene la misma humedad. El secado de volúmenes grandes de grano ocurre por capas, es decir que se definen tres zonas: la primera que está contigua a la entrada del aire, en donde el grano ya alcanzó la humedad de equilibrio, en seguida está la zona más ancha en donde llamada zona de secado en donde existe intercambio de calor y humedad entre el aire y el grano. En la capa superior el grano se encuentra aún en las condiciones iniciales.

Cuando el volumen total del grano alcanza la humedad promedio, el grano más cercano a la entrada de aire tiene la menor humedad (la de equilibrio) y el grano de capas superiores tiene una mayor humedad proporcional a la altura a la que se encuentra. Hukill desarrolló un método numérico para conocer la humedad del grano a determinados tiempos y alturas del silo. De todas formas, aunque las capas superiores permanezcan con una humedad alta una vez que se haya decidido detener el secado, gracias a la aireación y a la migración natural de la humedad, esta se homogeneiza a lo largo del silo.

v: es el volumen específico del aire seco. Con él se puede convertir el gasto volumétrico del ventilador a gasto másico. Se calcula fácilmente considerando al aire como un gas ideal:

$$v = \frac{RT}{P} \quad (8-2)$$

Donde $R=0.287$ kJ/kg.K

T : temperatura en K

P : presión atmosférica en kPa, 101.325 al nivel del mar, 78.8 en la Cd. de México.

Las unidades de cada miembro de la ecuación (8-1) se muestran en el siguiente cuadro.

Cuadro 8.1.1.- Unidades S.I. de los términos de la ecuación de balance de calor.

t	minutos
G	$m^3 / \text{min.}$
Ca	$\text{kJ} / \text{kg}^\circ\text{C}$
Ta, Tg	$^\circ\text{C}$
h	$\text{kJ} / \text{kg.}$
MS	kg
Mo, Mc	(decimal, base seca)
v	m^3 / kg

Como ya se vio anteriormente, existen gastos sugeridos para el aire de secado, en función de la humedad del grano, y serán tomados como referencia. Como el tamaño del silo es variable así como la cantidad de grano a secar, puede establecerse la misma ecuación de balance de calor independiente del término MS , cambiando G por Q en unidades $m^3/\text{min.ton}$ (gasto de aire por unidad de masa de grano húmedo):

$$tQC a(Ta - Tg) = hv \left(1 - \frac{Mo}{1 + Mo} \right) (Mo - Mf) \times 1000 \quad (8-3)$$

De manera muy similar se pueden predecir tiempos de secado y la humedad final del grano, considerando un simple balance de humedad: la humedad que pierde el grano es la que gana el aire. Entonces,

$$t\Delta WQ = v \left(1 - \frac{Mo}{1 + Mo} \right) (Mo - Mf) \times 10^6 \quad (8-4)$$

De igual forma se elimina la cantidad de grano utilizando Q en $m^3/\text{min.ton}$.

$\Delta W = (W_2 - W_1)$ es el cambio de humedad absoluta del aire ($\text{g H}_2\text{O} / \text{kg}$ aire seco) y se lee directamente en una carta psicrométrica (ver anexo II). W_1 es la humedad absoluta inicial y W_2 se lee siguiendo la línea adiabática hacia la saturación, hasta 90% HR, valor más práctico que 100% HR que en realidad nunca alcanza el aire. La ecuación (8-4) es particularmente útil cuando la diferencia de temperatura

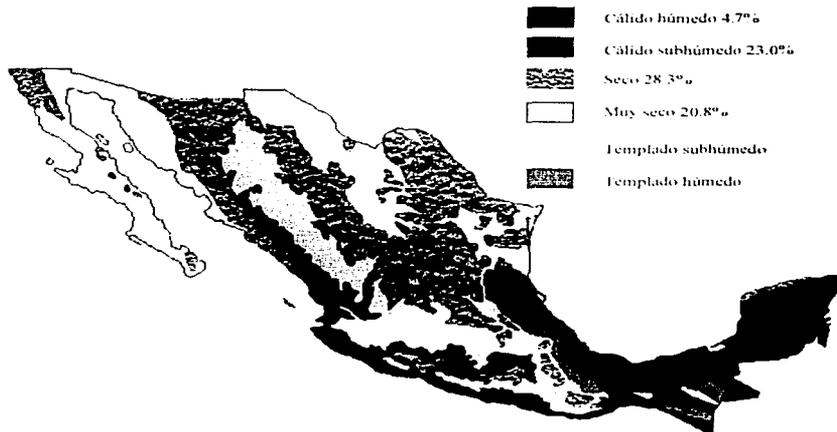
entre el grano y el aire es muy pequeña o no existe, por ejemplo cuando el secado se realiza por la noche con el aire ambiente.

El clima de la localidad en donde se realiza el secado es un factor importante ya que determina las condiciones iniciales: temperatura y humedad del aire, temperatura del grano, energía solar disponible, etc. Se evaluará el secado en tres tipos de localidades diferentes, en donde la producción de maíz y por lo tanto su cosecha es importante. Son eminentemente productores de maíz en México los siguientes estados, agrupados según su importancia:

1. Sinaloa.
2. Tamaulipas, Chiapas.
3. Chihuahua, Jalisco, Nuevo Leon, Oaxaca, Sonora, Veracruz, México, Guanajuato.

En los estados mencionados predominan básicamente dos tipos de clima según el INEGI: seco y templado subhúmedo (ver figura 8.1.1).

Figura 8.1.1- Tipos de clima en México.

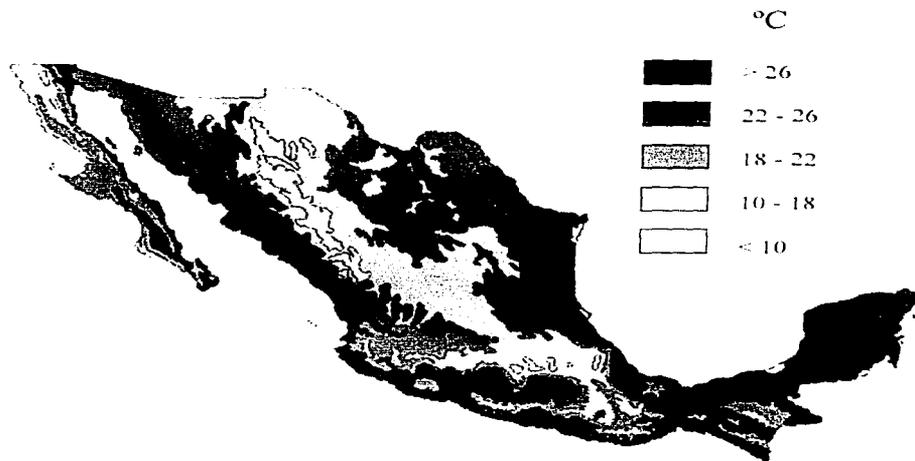


Fuente: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, Dirección General de Geografía. Cartas de climas, escala 1:1 000 000, México.

También se pueden reconocer tres grandes zonas de distribución de temperaturas anuales (figura 8.1.2):

- I. 10-18°C
- II. 18-22°C
- III. 22-26°C

Figura 8.1.2- Temperaturas medias anuales en México.



Fuente: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, Dirección General de Geografía. Cartas de temperaturas medias anuales, escala 1:1 000 000.

Se pueden proponer con los datos anteriores tres tipos de zonas climáticas en donde se evaluará el funcionamiento del silo:

1. Cálido semi-seco (correspondiente a Sinaloa)
2. Cálido húmedo (correspondiente a Tamaulipas y Chiapas)
3. Templado seco (correspondiente a Chihuahua, Jalisco, etc.)

De acuerdo a estadísticas se tomarán como condiciones promedio las del cuadro 8.1.2, equivalentes a los meses subsecuentes al período más importante de cosecha del maíz en México, es decir, finales del verano e inicio del otoño (septiembre-octubre).

Cuadro 8.1.2- Condiciones para el secado en tres tipos de clima.

	Tipo de clima		
	Cálido semi-seco	Cálido húmedo	Templado seco
Temp. promedio en el día (°C)	28	31	25
HR promedio en el día	45%	55%	35%
Temp. promedio en la noche (°C)	24	28	20
HR promedio en la noche	57%	65%	50%
Presión atmosférica (kPa)	90	100	80
Elevación de temperatura del aire por el colector solar (°C)	10	12	8

En todos los casos se tomará como tiempo de insolación efectivo 9.5 horas, tiempo en el que ocurrirá calentamiento del aire por el colector por día. No es que el sol sólo salga ese tiempo, sino que se considera una compensación por las nubosidades, viento, ángulo de incidencia, etc. Entonces las 14.5 horas restantes el aire entraría al silo a la temperatura ambiente.

8.2.- ESTUDIO DE CASOS

CASO 1

Clima: cálido semi-seco

en el día:

- ambiente 28°C, HR 45%
- elevación de temperatura por el colector solar 10°C
- temperatura del aire de entrada 38°C, HR 25%³⁶
- Humedad de equilibrio: 0.07% b.s.³⁷ (humedad mínima que puede alcanzar el grano)

³⁶ Leída en la carta psicrométrica (anexo II).

Despejando de la ecuación (8-3), podemos encontrar la humedad final M_f al tiempo t :

$$M_f = M_o - \frac{tQCa(T_a - T_g)}{\left(1 - \frac{M_o}{1 + M_o}\right)h_v \times 1000} \quad (8-5)$$

Donde $T_g = 28^\circ\text{C}$

$M_o = 0.35$ (consideramos 35% de humedad base seca igual a 26% base húmeda)

$Q = 3.3 \text{ m}^3/\text{min.t}$

$h = 2430 \text{ kJ/kg}$

$Ca = 1.005 \text{ kJ/kG}^\circ\text{C}$

v (38) = $0.96 \text{ m}^3/\text{kg}$

$t = 9.5 \text{ h} = 570 \text{ min.}$

Se puede entonces calcular la humedad final del grano al término del primer día de secado (9.5 horas)

$$M_f = 0.339$$

En seguida el agricultor tiene la opción de cerrar el silo y reanudar el secado a la mañana siguiente, o bien continuar el secado durante la noche con el aire natural.

En este último caso las condiciones iniciales son:

$$M_o = 0.339 = M_f \text{ anterior}$$

temp. ambiente = temp. del grano = temp. de entrada = temp. de salida = 24°C

HR entrada = 57% $W_1 = 10.5$

HR salida = 90% $W_2 = 12.5$ (W_1 y W_2 leídos en la carta psicrométrica, anexo II)

$v = 0.95$ (calculado para 24°C y 90 kPa)

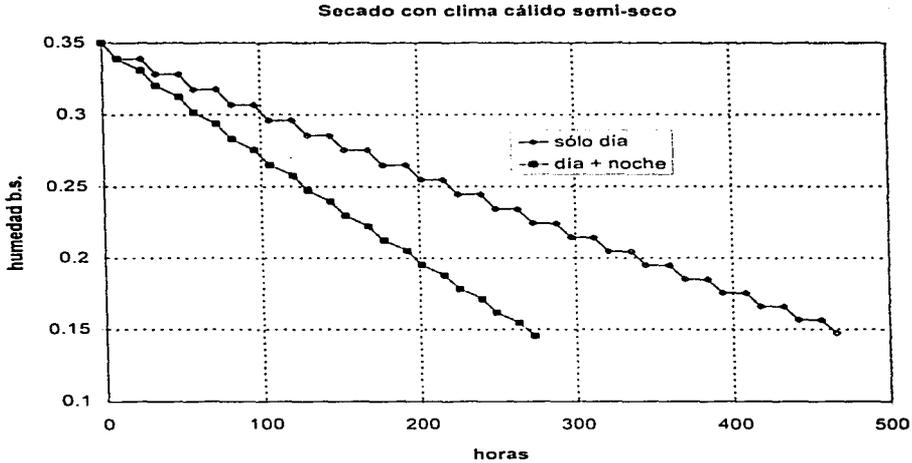
$t = 14.5 \text{ horas} = 870 \text{ min.}$

Se obtienen los siguientes resultados para el caso I

	secado sólo de día	secado día y noche
tiempo de secado	462.7 h = 19 días 6 h 44 min.	268.9 h = 11 días 4 h 52 min.
tiempo de uso del ventilador	187.2 h	268.9 h
	en el día	en la noche
% humedad b.s. retirado / periodo	0.93 - 1.10	0.7 - 0.8

³⁷ Calculado con la ecuación de Chung, para las condiciones dadas.

³⁸ De la ecuación (8-2), para las condiciones ambientales dadas

**CASO 2**

Todos los cálculos se hacen de la misma forma que en el caso 1.

Clima: cálido húmedo

En el día:

- ambiente 31°C, HR 55%
- elevación de temperatura por el colector solar 12°C
- temperatura del aire de entrada 44°C, HR 28%
- Humedad de equilibrio: 0.07% b.s.

$$T_g = 31^\circ\text{C}$$

$$M_o = 0.35$$

$$Q = 3.3 \text{ m}^3/\text{min.t}$$

$$h = 2430 \text{ kJ/kg}$$

$$Ca = 1.005 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$$

$$v = 0.87 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$t = 9.5 \text{ h} = 570 \text{ min.}$$

En la noche:

temp. ambiente = temp. del grano = temp. de entrada = temp. de salida = 24°C

$$\text{HR entrada} = 65\% \quad W'_1 = 15.2$$

$$\text{HR salida} = 90\% \quad W'_2 = 16.8$$

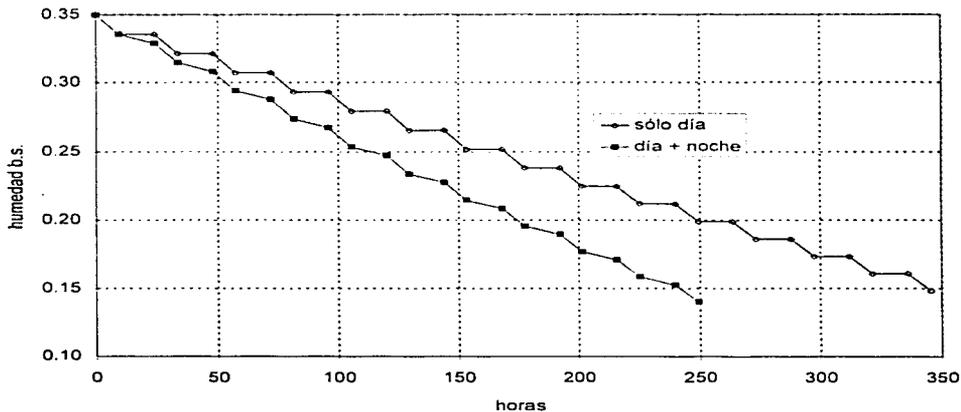
$$v = 0.86 \text{ (para } 28^\circ\text{C y } 100 \text{ kPa)}$$

$$t = 14.5 \text{ horas} = 870 \text{ min.}$$

Se obtienen los siguientes resultados para el caso 2:

	secado sólo de día	secado día y noche
tiempo de secado	344.2 h = 14 días 8 h 13 min.	242 h = 10 días 2 h 00 min.
tiempo de uso del ventilador	141.2 h	242 h
	en el día	en la noche
% humedad b.s. retirado / periodo	1.25 - 1.45	0.59 - 0.67

Secado con clima cálido húmedo



CASO 3

Todos los cálculos se hacen de la misma forma que en el caso 1.

Clima: templado seco

En el día:

- ambiente 25°C, HR 35%
- elevación de temperatura por el colector solar 8°C
- temperatura del aire de entrada 32°C, HR 23%
- Humedad de equilibrio: 0.072% b.s.

$$T_g = 25^\circ\text{C}$$

$$M_o = 0.35$$

$$Q = 3.3 \text{ m}^3/\text{min.t}$$

$$h = 2430 \text{ kJ/kg}$$

$$C_a = 1.005 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$$

$$v = 1.07 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$t = 9.5 \text{ h} = 570 \text{ min.}$$

En la noche:

temp. ambiente = temp. del grano = temp. de entrada = temp. de salida = 20°C

$$\text{HR entrada} = 50\% \quad W_1 = 7.25$$

$$\text{HR salida} = 90\% \quad W_2 = 9.25$$

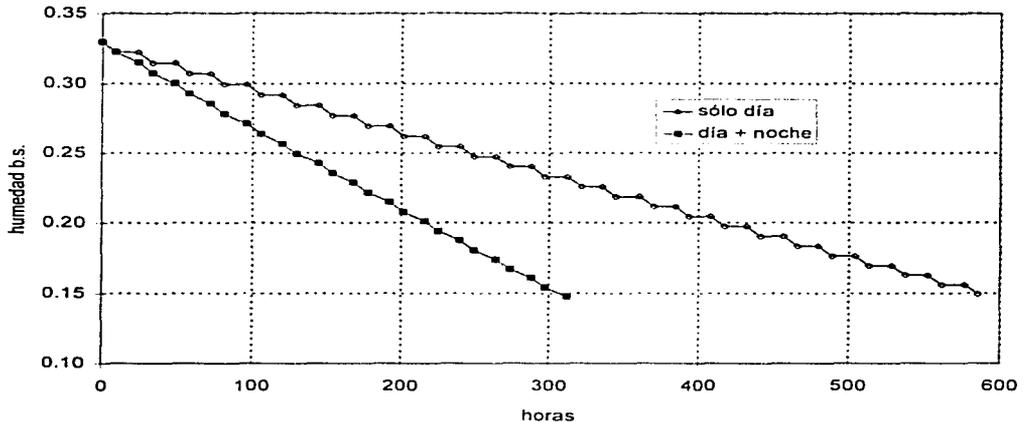
$$v = 1.05 \text{ (para } 20^\circ\text{C y } 80 \text{ kPa)}$$

$$t = 14.5 \text{ horas} = 870 \text{ min.}$$

Se obtienen los siguientes resultados para el caso 3

	secado sólo de día	secado día y noche
tiempo de secado	584.8 h = 24 días 8 h 50 min.	307.5 h = 12 días 19 h 31 min.
tiempo de uso del ventilador	236.8 h	307.5 h
	en el día	en la noche
% humedad b.s. retirado / periodo	0.70 - 0.77	0.66 - 0.73

Secado con clima templado seco



Los resultados anteriores muestran que secar durante la noche además de en el día, puede representar un ahorro en tiempo de secado a expensas de un mayor gasto de energía para operar el ventilador, proporcional al tiempo de uso, como se ve en el siguiente cuadro:

Cuadro 8.2.1.- Ventaja y desventaja del secado complementario en la noche

CASO	Clima	Ahorro en tiempo de secado	Energía extra utilizada
1	cálido semi-seco	42.0%	43.6%
2	cálido húmedo	29.7%	71.4%
3	templado seco	47.4%	29.9%

Es claro que en el caso 2, dado que el clima es húmedo, el secado durante la noche es muy ineficiente y por lo tanto si se seca el grano en ese momento, el ahorro de tiempo es bajo en comparación con el importante aumento del gasto de energía. Sin embargo, en climas más secos, como en el caso 3, el

secado durante la noche vale la pena ya que se obtiene un ahorro sustancial en el tiempo total de secado a bajo costo energético.

Para ilustrar lo anterior, se hará un ejemplo con el silo piloto ubicado en San Miguel de Allende, Guanajuato, que consiste en dos celdas hexagonales de 100 ton. de capacidad aproximadamente.

Si se quiere conocer el costo en pesos del secado (o más bien de la operación del ventilador), se emplean las ecuaciones de la sección 5.1.3 referente al cálculo de la potencia del ventilador. Y así, conociendo el tiempo de secado y la tarifa eléctrica, se puede estimar el costo.

Se establecen los siguientes datos:

Altura de la celda, h_s : 8.5 m.

Humedad inicial del grano : 25% b.h.

Gasto por unidad de masa, Q : 3.3 m³/min.t (se elige de los gastos recomendados)

Densidad del grano, δ : 670 kg/m³

Se obtiene:

$$Qa = 0.0709 \text{ (m}^3\text{/m}^2\text{.s)}$$

$$\Delta P = 90.6 \text{ Pa/m}$$

$$W = 4483 \text{ watts} = 6 \text{ hp. (1hp} = 746 \text{ W)}$$

El ventilador para el secado debe tener una potencia de 6 hp.

Dada la localidad del silo, se toma como tiempo de secado el calculado para clima templado seco, unas 300 horas, entonces el consumo de energía es:

$$4.483 \text{ kW} \times 300 \text{ h} = 1345 \text{ kW.h}$$

La tarifa 9M de uso agrícola en media tensión establecida por la CFE para el mes de septiembre de 1997 es de \$0.16217 por cada uno de los primeros 5000 kilowatts-hora consumidos³⁰. El secado de maíz de 33% b.s (25% b.h.) a 15% b.s. (13% b.h.) de contenido de humedad, con operación continua del ventilador costaría en septiembre de 1997, para una celda:

³⁰ Las tarifas según el uso, la localidad, el mes y el año se pueden encontrar en internet:
<http://www.cfe.gob.mx/gercom/tarif97/tarifa.html>

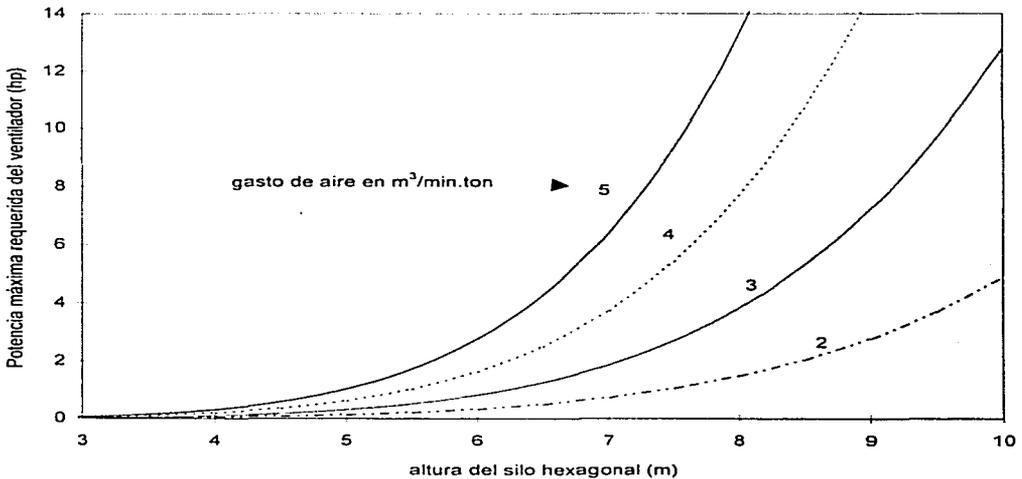
costo en pesos = $1345 \times 0.16217 = \$218.10$

La ecuación (5-1) de la sección 5.1.3 puede reescribirse en función de parámetros que el operador del silo pueda conocer fácilmente: el gasto de aire por unidad de masa de grano Q (se escoge según las recomendaciones, en función del clima y la humedad inicial del grano), la densidad del grano δ (entre 650 y 750 kg/m^3) y la altura del silo. Se obtiene,

$$\text{Potencia (hp)} = \frac{Q^3 \delta^3 (hs)^3 \times 1.26394 \times 10^{-12}}{\ln(1 + Q\delta hs \times 1.1473 \times 10^{-3})} \quad (8-6)$$

Para dar una idea del tamaño del ventilador en función del tamaño del silo, el agricultor puede consultar la siguiente gráfica basada en la ecuación (8-6).

Gráfica 8.2.1.- Potencia máxima del ventilador en función de la altura del silo, para diferentes valores de Q .



La selección del tamaño del silo y del gasto de aire para el secado son dos decisiones críticas, pues alturas mayores a 8 m o gastos mayores a $4 \text{ m}^3/\text{min.ton}$ pueden traducirse en requerimientos de potencia enormes (más de 8 hp).

El secado en el silo es sin duda una opción muy económica para el agricultor, si varios campesinos con propiedades pequeñas que cosechen de 5 a 10 ton al año se unen para utilizar un solo silo, únicamente tendrían que desembolsar unos 20 o 30 pesos al año para secar toda la cosecha (dado que se cosecha una vez al año). Garantizar la calidad de su producto secándolo y conservándolo en el silo solar hexagonal con tan poca inversión es una excelente alternativa en comparación con el sistema tradicional que es más barato pero a cambio de una mala calidad del producto y también en comparación con sistemas de secado convencionales con los cuales la inversión debe ser mucho mayor.

Todo el análisis anterior del secado sólo debe ser considerado como una aproximación a la realidad, pues se hicieron las siguientes suposiciones, que no necesariamente corresponden a cada caso particular:

Se escogió un gasto constante de $3.3 \text{ m}^3/\text{min.t}$ para secar gran con $M_0 = 0.35 \%$ b.s., cuando es el mínimo recomendado en la literatura. Bien se pudo haber elegido un valor de Q de hasta $5.5 \text{ m}^3/\text{min.t}$ o más. Otro punto al respecto es que aunque Q es un valor constante, G (m^3/min) no lo es y obviamente deberá ser ajustado por el operador según la cantidad de grano que desee secar.

Fueron consideradas condiciones climáticas promedio, las cuales son imposibles de predecir y controlar, y además habrá localidades en donde se utilice el silo y el clima sea muy diferente. Variaciones marcadas de temperatura, humedad relativa, tiempo de insolación, lluvia, afectarán la eficiencia del colector solar y por lo tanto al secado. En días lluviosos, el secado definitivamente debe ser detenido.

El agricultor puede dar prioridad al ahorro de energía y no al tiempo de secado, entonces evitará el secado nocturno cada dos o tres noches, o bien sólo secará en las primeras noches para evitar deterioro

del grano. Como ya se vio, secar sólo de día resulta en tiempos demasiado prolongados de secado y se corre el riesgo de que el grano sea atacado a causa del desarrollo de microorganismos.

La eficiencia del colector juega igualmente un papel vital. Mucho depende del clima, que no es controlable, pero también del diseño del colector. Un aumento de menos de 5°C de la temperatura del aire resultaría en un secado casi tan ineficiente como el que se efectuaría con aire sin calentar. Por otra parte, como colectar la energía solar no es fácil, un aumento en la temperatura del aire de entre 8 y 12°C se considera adecuado, pues con él se puede secar el maíz de 35% a 15% de humedad base seca en tan solo 10 días. Aumentar el incremento de temperatura no resultará en una reducción significativa del tiempo de secado, pero reducirlo sí tendría un efecto indeseable importante.

Por lo anterior, es importante calcular cuidadosamente el diseño del colector y ajustarlo a los gastos de aire que serán empleados en silos de determinada capacidad.

Los cálculos realizados para estimar los tiempos de secado en diferentes condiciones climáticas no garantiza la uniformidad del secado en su interior. De hecho, dada la geometría del silo, la predicción del comportamiento interno se dificulta y uno de los propósitos de este trabajo es estudiar dicho comportamiento y caracterizarlo, mediante la experimentación.

CAPÍTULO IX

EXPERIMENTACIÓN

9.1.- MATERIALES Y EQUIPO.

Las pruebas de secado se realizaron en un modelo del silo hexagonal a escala 1:16 respecto al construido en San Miguel de Allende Guanajuato (constituido de dos celdas de 100 ton. cada una). El modelo tiene una estructura de metal y las paredes están constituidas de acrílico transparente. El acrílico es un buen aislante térmico y puede simular de buena forma las paredes de concreto del silo, ya que por éstas no hay transferencia de calor entre el grano y los alrededores.

Como se pretende simular el secado del maíz, también el grano debe estar a escala. Por esta razón se empleó mijo (también llamado sorgo) el cual tiene un tamaño equivalente de 1:14 con respecto al maíz. Además el mijo posee características físicas similares a las del maíz como la densidad o el espacio intergranular (ver cuadro 9.1.1), y se comporta durante el secado en forma muy similar a él. Esto se puede observar con la ecuación de Chung que determina las humedades de equilibrio en función de la humedad relativa del aire a una temperatura dada (ver gráfica 9.1.1).

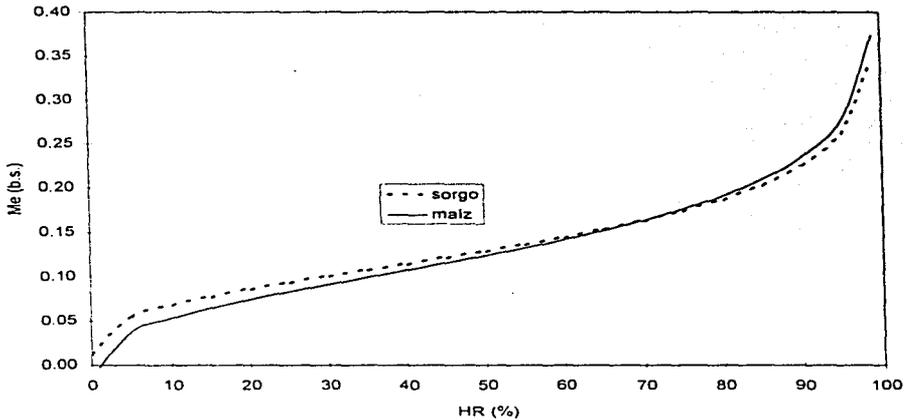
Cuadro 9.1.1.- Algunas similitudes físicas entre el mijo y el maíz.

	mijo	maíz
Densidad (15% hum b.h.) en kg/m ³	721	721
Espacio intergranular en %	37	40

Cuadro 9.1.2.- Constantes de la ecuación de Chung.

	E	F	C
Mijo	0.35649	0.050907	102.849
Maíz	0.33872	0.058970	30.205

Gráfica 9.1.1.- Isotermas del maíz y mijo a 25°C.



Los ductos de distribución del aire y el piso falso se construyeron de poliestireno de 3 mm de espesor. Para forzar el paso del aire de secado a través del grano se usó un ventilador centrífugo de aspas curvadas hacia atrás de 1/2 hp.

9.2.- INSTRUMENTACIÓN.

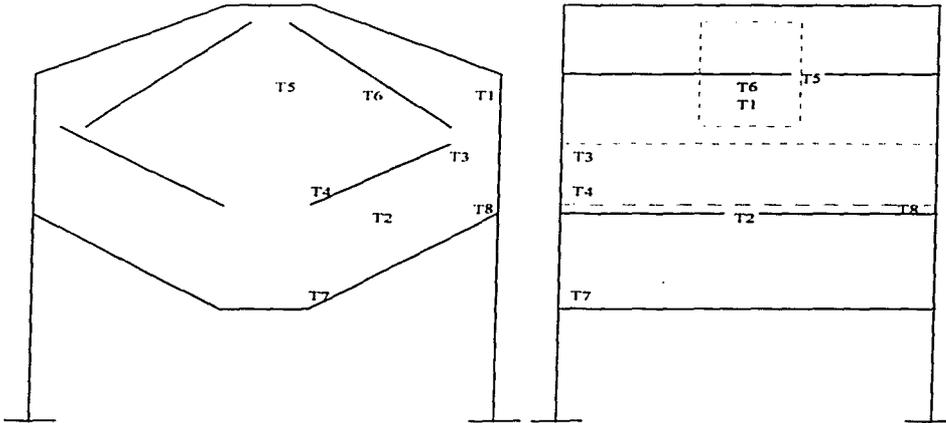
El calentamiento solar del aire se simuló con el uso de una resistencia de temperatura controlada, ubicada a la salida del ventilador.

La humedad y temperatura del aire a la entrada y a la salida del silo se midieron con un psicrómetro digital con una precisión de $\pm 0.2^\circ\text{C}$ y $\pm 1\%$ HR marca Cole Parmer.

Para controlar la temperatura de la resistencia se usó un termopar digital.

Para conocer el desarrollo del secado al interior del silo, se colocaron termotransistores en puntos estratégicos de un lado, como se ve en la figura 9.2.1, dado que la estructura es simétrica.

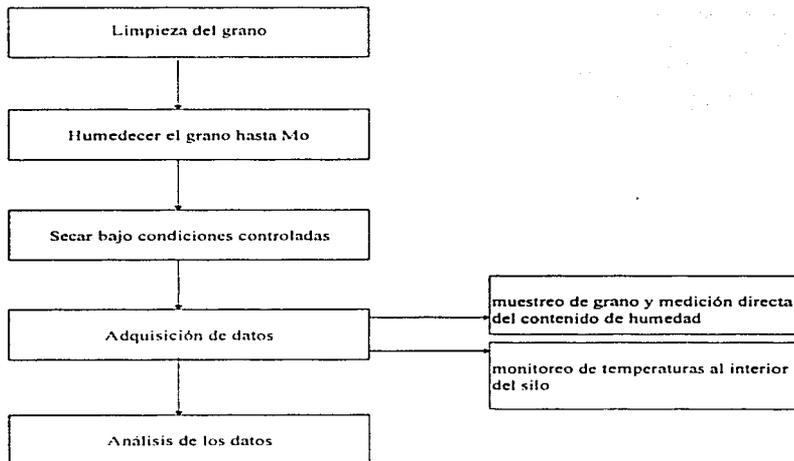
Figura 9.2.1.- Ubicación de los termómetros en el silo.



La señal de los termotransistores fue interpretada por medio de un convertidor A/D y leída con ayuda de una computadora, los datos se almacenaron para su posterior análisis. Las lecturas se llevaron a cabo a intervalos de tiempo de 5 min. cada uno.

9.3.- METODOLOGÍA

El procedimiento seguido fue el siguiente:



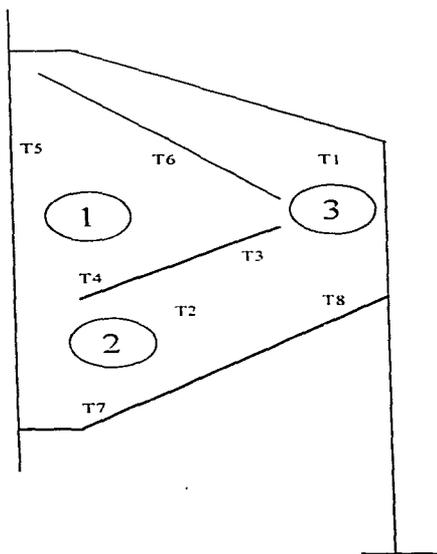
- **Limpieza del grano:** se utilizó un sistema de mallas para separar la materia extraña y el tamo del grano.
- **Humedecimiento del grano:** se determinó la humedad inicial (10.5%) y se agregó la cantidad de agua necesaria para que el grano alcanzara las condiciones deseadas. Para garantizar la homogeneidad, se hicieron rotar recipientes con el grano ya húmedo por varias horas en una máquina de rodillos.
- **Secado del grano:** el secado se llevó a cabo a flujo constante de aire, calentado a temperatura constante durante el día y sin calentamiento durante la noche. Se monitoreó automáticamente la temperatura al interior del silo con los termotransistores, y las condiciones del aire de entrada y salida (temperatura y humedad relativa) periódicamente.

- La humedad del grano se determinó tomando muestras y secándolas en una estufa (110 °C durante 20 h). Una vez seco el grano, se calcula la humedad por diferencia en peso, el peso inicial y final se determinó con ayuda de una balanza analítica.

Al término de cada período de secado (diurno o nocturno) se tomó una muestra de grano de la superficie. De esta forma se puede inferir acerca de la evolución del secado global dado que siempre es la zona que seca hacia el final y por lo tanto siempre es la más húmeda.

Para estudiar el secado dentro del silo, cada mitad puede ser dividida arbitrariamente en 3 partes dado que es simétrico (figura 9.3.1).

Figura 9.3.1.- División en 3 zonas del silo hexagonal.

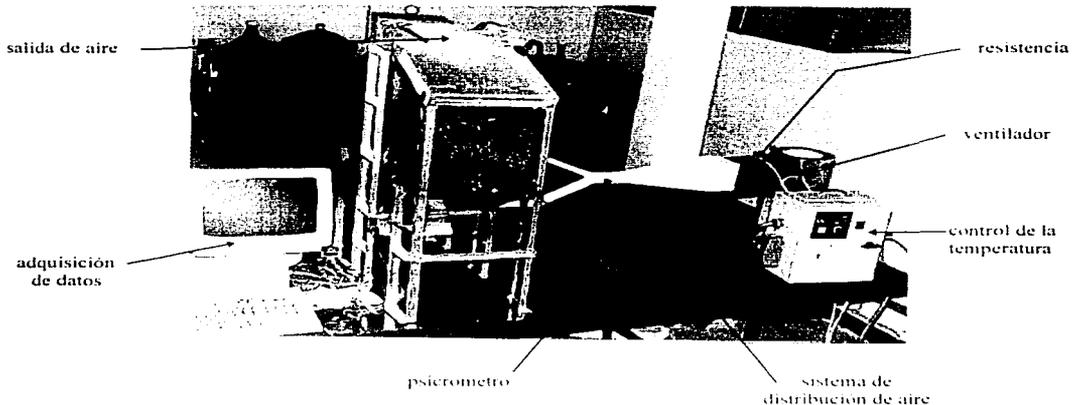


El sistema de distribución del aire se diseñó de tal forma que todo el grano en cualquier parte del silo recibe la misma cantidad de aire. Dicho de otra forma, las capas superiores de cada una de las tres zonas se secan al mismo tiempo. Se colocaron tres termómetros en la zona 1, tres en la zona 2 y dos en la zona 3.

La temperatura en cada punto del silo indicará qué tan seco se encuentra el grano en esa zona, si la temperatura es igual a la temperatura de entrada del aire, significa que el grano está seco y por lo tanto no hay intercambio ni de calor ni de humedad. Si la temperatura es igual a la temperatura inicial del grano o a la del ambiente (que generalmente son las mismas), significa que el grano no ha iniciado a secarse. Si la temperatura se encuentra entre la temperatura de entrada y la temperatura de salida, entonces el grano se está secando, y a mayor temperatura, más seco se encuentra el grano.

Una forma de saber que todo el grano se ha secado es verificando que en todas las zonas del silo la temperatura se ha igualado a la temperatura de entrada del aire. Esto se puede comprobar midiendo la humedad a la capa superior de grano, ubicada a la salida del aire.

El montaje del experimento se muestra en la foto:



9.4.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Peso y humedad del grano al inicio y al final del secado:

	Inicial	Final
Peso húmedo de grano	37.300 kg	32.380 kg
Humedad promedio del grano	30.45% b.s., 23.34% b.h.	13.24 % b.s., 11.69 %b.h.

Peso de materia seca: 28.593 kg

Tiempo total de secado: 3 días 4 h (76 horas)

de día: 37 h

de noche: 39 h

Después de 3 días y 4 horas (76 horas) de secado continuo día y noche de grano inicialmente a una humedad de 30.45% b.s., el total del grano alcanzó una humedad promedio de 13.24 %b.s. Las condiciones del secado fueron las siguientes:

(b.h.=base húmeda; b.s.= base seca).

Cuadro 9.4.1.- Condiciones experimentales del secado.

	De día	De noche
Temperatura de entrada	38-40°C	23°C (min 21, max 24.2) = ambiente
Humedad relativa	14-16%	35% (min 28.1, max 41.5) = ambiente
Q (gasto de aire en m ³ /min.t)	7.26	7.26
v (a 23°C, 78.8 kPa, en m ³ /kg)	1.079	1.079

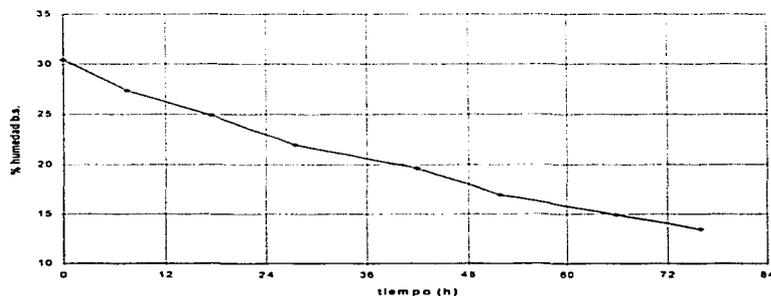
Cuadro 9.4.2.- Humedad promedio del grano y humedad retirada por período de secado.

tiempo (horas:min)	% humedad b.s.	% humedad b.s. retirada
0:00	30.45	-
7:30	27.37	3.08
17:30	24.88	2.49
27:30	21.97	2.91
42:00	19.66	2.31
52:00	16.97	2.69
66:00	14.95	2.02
76:00	13.48	1.47

Estos valores de humedad indican básicamente dos cosas. Primero, se vio que la teoría del secado por capas es muy rígida, ya que en realidad toda la masa del sorgo se empezó a secar desde el inicio, no importando la distancia a la que se encontraba de la entrada de aire; claro que siempre se secarán más rápido las capas inferiores que las superiores. De ahí lo segundo, el contenido de humedad del grano de la superficie es siempre el límite superior del rango de humedades del total en el silo, se acerca cada vez más al valor promedio conforme transcurre el secado, y de hecho se igualan las humedades cuando todo el grano se ha secado hasta la humedad de equilibrio.

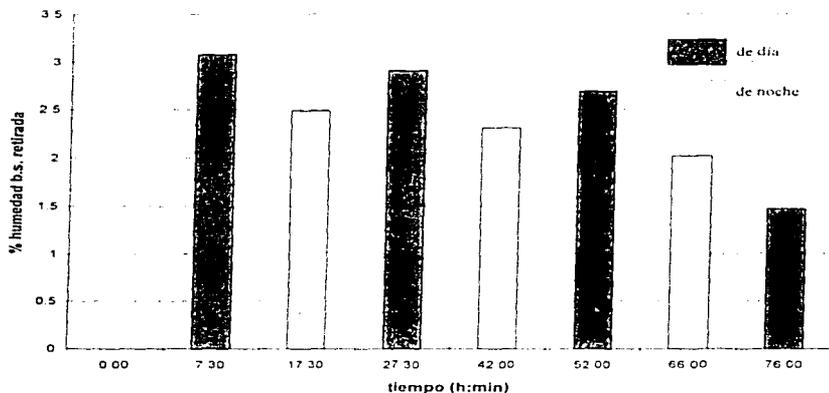
El desarrollo del secado de la capa superior se observa en la siguiente gráfica. Los segmentos con pendiente más pronunciada corresponden al secado de día con calentamiento del aire.

Gráfica 9.4.1- humedad (%b.s.) de la capa superior de grano vs. tiempo de secado.



En la siguiente gráfica se observa la humedad que es retirada del grano superficial. Contra lo que establece el secado por capas, desde el primer día hay una importante pérdida de humedad en esa zona y es cada vez menor conforme pasa el tiempo. Lógicamente es más importante el secado en el día que en la noche. Llega un momento en que disminuye sensiblemente la cantidad de humedad quitada, lo que significa que se ha llegado a un punto en que es más difícil retirar la humedad y por lo tanto debe pensarse en dar por terminado el secado (dado que se vuelve ineficiente y costoso).

Gráfica 9.4.2.- % de humedad b.s. retirado de día y de noche



Las ecuaciones utilizadas en la evaluación teórica no consideran el hecho de que aunque no se haya alcanzado la humedad de equilibrio, la razón de pérdida de humedad por tiempo tiende a disminuir y entonces el secado se vuelve muy ineficiente y en general también innecesario pues seguramente ya se ha alcanzado un nivel de humedad seguro para el almacenamiento (normalmente de 3 a 5 puntos porcentuales de humedad b.s. por encima de la humedad de equilibrio).

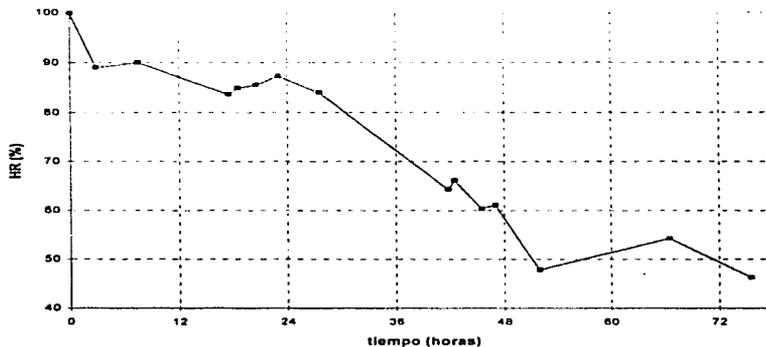
Considerando las condiciones del aire de salida, lo anterior se traduce en un incremento de la temperatura y una disminución de la humedad relativa. Cuando el aire pasa a través de una masa

húmeda, tiende a saturarse y a enfriarse hasta la temperatura inicial del producto, tal y como sucede en las primeras horas del secado. Cuando este tiende a su fin, la temperatura de salida deja de mantenerse constante y aumenta. Por su parte la humedad relativa disminuye, o bien, ya no retira la misma humedad y en vez de salir a 100% HR sale a menos de 50% HR. Esto se observa en los siguientes datos.

Cuadro 9.4.3.- Humedad relativa y temperatura de salida del aire durante el secado.

tiempo (h: min)	HR (%)	Temperatura (°C)
0:00	99.9	24.5
2:50	89.0	22.0
7:30	90.0	21.3
17:30	83.6	16.8
18:30	84.9	17.6
20:30	85.5	20.6
23:00	87.2	21.2
27:30	84.0	23.2
41:50	64.3	20.0
42:30	66.1	20.2
45:30	60.3	23.7
47:00	61.1	23.0
52:00	47.8	25.6
66:30	54.3	20.0
75:30	46.3	25.2

Gráfica 9.4.3.- Humedad relativa del aire de salida vs. tiempo

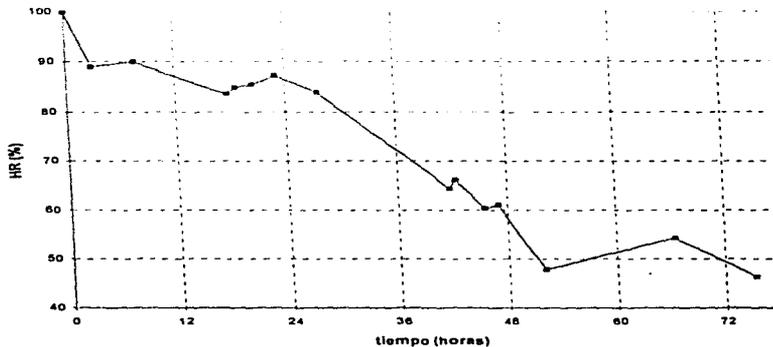


húmeda, tiende a saturarse y a enfriarse hasta la temperatura inicial del producto, tal y como sucede en las primeras horas del secado. Cuando este tiende a su fin, la temperatura de salida deja de mantenerse constante y aumenta. Por su parte la humedad relativa disminuye, o bien, ya no retira la misma humedad y en vez de salir a 100% HR sale a menos de 50% HR. Esto se observa en los siguientes datos.

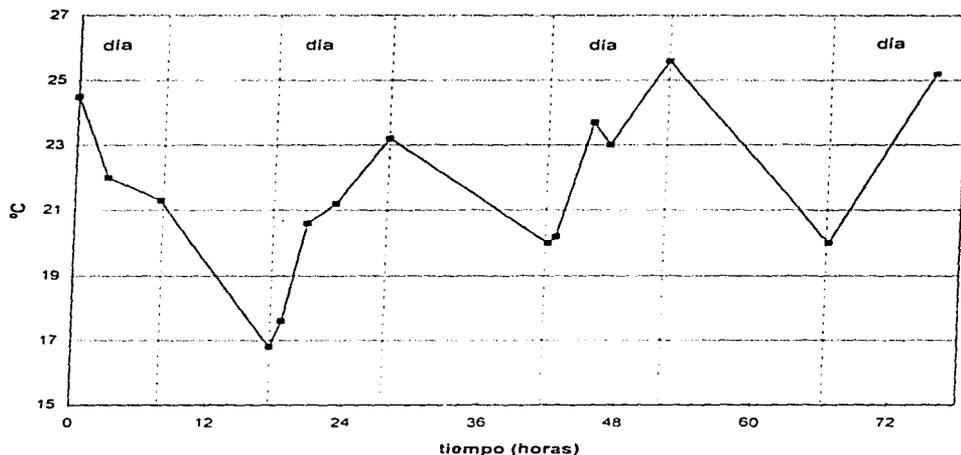
Cuadro 9.4.3.- Humedad relativa y temperatura de salida del aire durante el secado.

tiempo (h: min)	HR (%)	Temperatura (°C)
0:00	99.9	24.5
2:50	89.0	22.0
7:30	90.0	21.3
17:30	83.6	16.8
18:30	84.9	17.6
20:30	85.5	20.6
23:00	87.2	21.2
27:30	84.0	23.2
41:50	64.3	20.0
42:30	66.1	20.2
45:30	60.3	23.7
47:00	61.1	23.0
52:00	47.8	25.6
66:30	54.3	20.0
75:30	46.3	25.2

Gráfica 9.4.3.- Humedad relativa del aire de salida vs. tiempo



Gráfica 9.4.4.- Temperatura del aire de salida vs. tiempo.

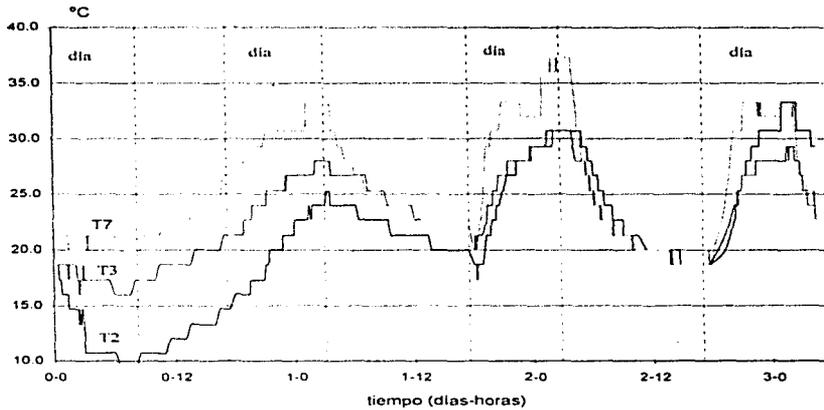


Con la excepción del primer periodo de secado diurno, se observa que en el día la temperatura de salida aumenta, pero nunca se acerca a la temperatura de entrada (38-40°C) -lo haría si el tiempo de secado con calentamiento fuera más largo-, sólo llega a pasar por encima de algunos grados la temperatura inicial del grano. Por la noche, sería lógico que el aire saliera a la misma temperatura a la que entró (21-23°C), pero se enfría paulatinamente hasta unos 5°C, dado que se humedece adiabáticamente (visto en la carta psicrométrica, esto se traduce en un incremento de la humedad relativa y una disminución de la temperatura).

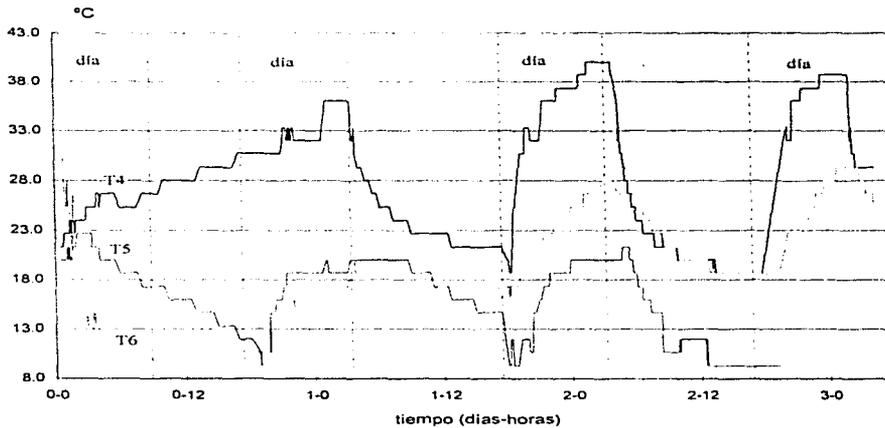
Se dio seguimiento al comportamiento de la temperatura al interior de cada zona (definidas en la metodología) y se ilustra en las siguientes tres gráficas.

En general se observó lo que se esperaba: entre más cerca de la entrada de aire se encuentre el grano, más rápido se seca, lo que se observa como un mayor incremento de la temperatura durante el día y por ende un enfriamiento más pronunciado.

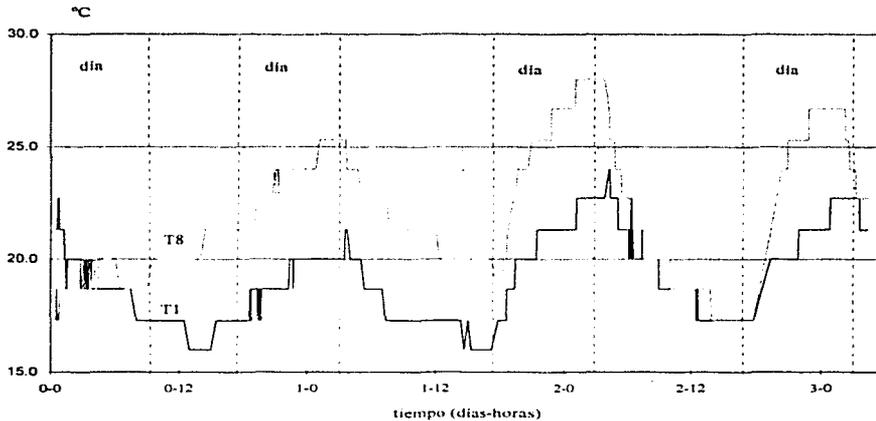
Gráfica 9.4.5.- Temperatura vs tiempo en la zona 1.



Gráfica 9.4.6.- Temperatura vs. tiempo en la zona 2.



Gráfica 9.4.7.- Temperatura vs. tiempo en la zona 3.



Conforme transcurre el secado en el día, la diferencia de temperatura entre puntos a diferentes alturas de una zona disminuye y tienden a igualarse cuando finaliza el secado. Esto se debe a que el secado ocurre por capas: las capas que ya están secas se encuentran a la temperatura de entrada del aire, las capas que se están secando se calientan constantemente, y las capas que aún no se secan no aumentan su temperatura o muy poco dado que están sometidas a un flujo de aire que ya se enfrió a la temperatura inicial del grano porque ya hubo transferencia de calor con las capas inferiores de grano.

De noche, al entrar el aire a la temperatura ambiente y encontrarse inicialmente el grano caliente a causa del secado solar, hay un enfriamiento primero rápido y después más lento. La primer etapa de enfriamiento rápido se debe a dos eventos:

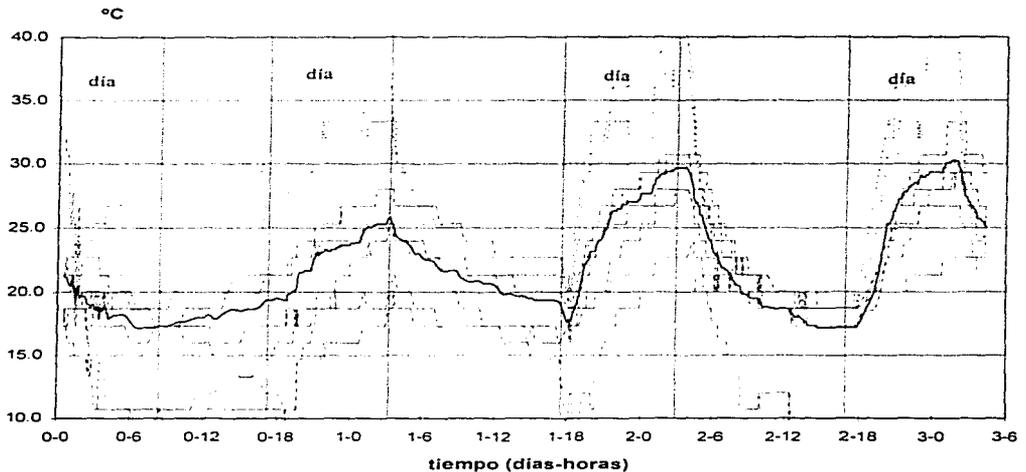
- 1.- Transferencia directa de calor entre el aire frío y el grano caliente.
- 2.- Secado del grano: dado que el aire ya no cuenta con la energía extra proporcionada por el sol, ahora al quitar humedad se ve obligado a disponer de energía del grano para evaporar la humedad que en él se

encuentra. esto resulta en el enfriamiento del producto. Mientras el grano se esté secando, el enfriamiento, aunque más lento, continúa aún cuando las temperaturas del aire y el grano se hayan igualado (el primer evento deja de ocurrir). El producto puede disminuir su temperatura incluso por debajo del ambiente (2 o 3°C).

Si la temperatura se estabiliza en un mínimo en la noche, quiere decir que el secado es muy lento y por lo tanto el producto ya se encuentra suficientemente seco. De igual forma se puede considerar completado el secado si en el día la temperatura alcanza y se mantiene en un máximo cercano a la temperatura de entrada.

Si se calcula el promedio de los ocho termómetros, se puede definir con mayor claridad la conducta del silo, como se muestra en la gráfica siguiente.

Gráfica 9.4.8.- Temperatura promedio en el silo vs. tiempo.

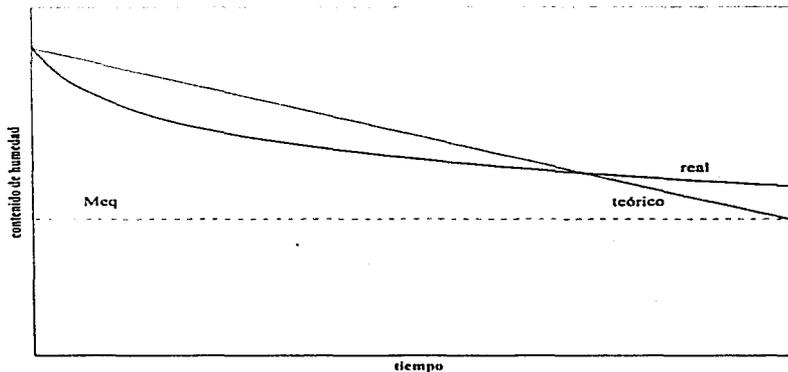


Al inicio del secado hay un enfriamiento a pesar de que se suministra al sistema aire caliente, debido a que la pérdida de humedad enfría al grano y es de tal magnitud que este efecto es preponderante al calentamiento por el aire de secado. Más adelante se observa un comportamiento generalizado: calentamiento en el día y enfriamiento en la noche. El aumento de la temperatura en el día es cada vez mayor y tiende a alcanzar un máximo que, como ya se mencionó previamente, indica que el grano ya está suficientemente seco.

La magnitud del aumento de temperatura puede relacionarse con la cantidad de humedad retirada del producto, y es inversamente proporcional: en los primeros días del secado, el cambio global de temperatura es pequeño y la humedad quitada al grano es grande, mientras que en las últimas horas el calentamiento -y el enfriamiento- son más importantes pero se retira menos humedad.

Asumimos entonces que la razón de pérdida de humedad con respecto al tiempo disminuye, lo cual contradice la evaluación teórica, en donde las ecuaciones utilizadas representan una disminución constante del contenido de humedad al transcurrir el tiempo de secado. La diferencia se observa en la siguiente gráfica.

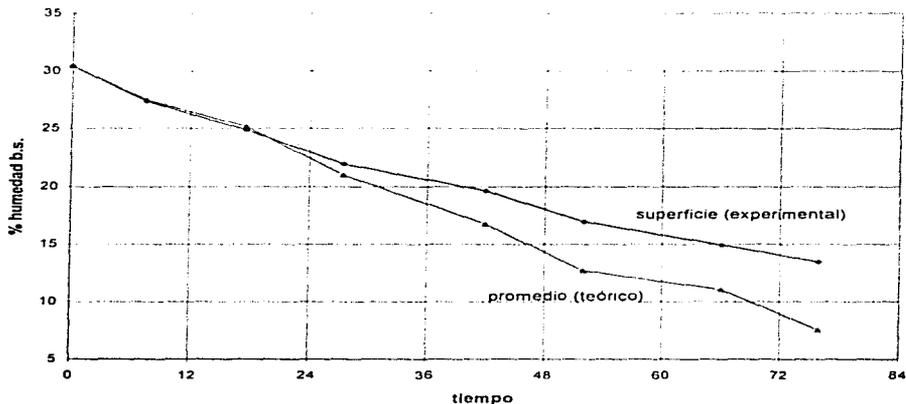
Gráfica 9.4.9.- Diferencia entre el comportamiento real y teórico.



La simulación teórica primero estima tiempos de secado largos pues no considera que al inicio del secado la disminución del contenido de humedad es rápida. Para tiempos más largos, la ecuación resulta optimista pues tampoco considera que conforme el contenido de humedad se acerca a la humedad de equilibrio el grano pierde cada vez menos humedad por unidad de tiempo.

Retomando los datos de la gráfica 9.4.1, se puede hacer una comparación entre datos teóricos y experimentales con la gráfica presentada más adelante. Hay que aclarar que la comparación no puede hacerse directamente ya que se trata por un lado de la humedad promedio del grano, y por otro de la humedad en una zona específica. En las primeras horas de secado el promedio teórico es muy similar a la humedad superficial experimental, por lo que la ecuación teórica da valores mayores a los reales. Hacia el final del secado, en teoría el grano alcanza una humedad de 8 % b.s., pero el grano en realidad tiene 14 % b.s. de humedad. En este caso la humedad de la superficie es cercana a la humedad promedio del total, entonces la estimación teórica ahora resulta en valores de contenido de humedad demasiado bajos. Esto significa que si se quiere calcular el tiempo de secado hasta valores cercanos a la humedad de equilibrio, con la ecuación teórica se obtendrá un tiempo muy corto.

Gráfica 9.4.10.- Comparación entre humedad del grano experimental y teórica.



La humedad de equilibrio (Meq) es la mínima humedad a la que se puede secar el grano y depende exclusivamente de las condiciones ambientales (temperatura y humedad relativa). Este valor cambia según si es de día o de noche, pues de día el aire es calentado y por lo tanto la temperatura es alta y la HR baja, mientras que en la noche es al contrario: la temperatura es baja y la humedad alta. Entonces en el día en teoría, en un clima seco templado, el maíz puede secarse hasta 7 %b.s., pero en la noche sólo hasta 13%. Secar el grano hasta Meq es innecesario e incluso absurdo, una vez alcanzada la humedad segura para el almacenamiento (14-15 %b.s.) el secado debe detenerse, esta humedad generalmente es cercana a la Meq para las condiciones de secado sin calentamiento. Así, si en el día se sobrepasara el valor de Meq nocturno, la operación del sistema de secado en la noche siguiente resultaría en el humedecimiento del grano.

En general, el control de las operaciones de secado y aireación del silo solar hexagonal dependerán de las condiciones climáticas de la localidad pero también de algunas decisiones que el agricultor deberá tomar, como el gasto de aire que empleará, la potencia del ventilador que se reflejará en la inversión inicial, el tiempo de operación del silo, si secará de día y/o de noche, etc. El silo puede incluso contar con sensores de humedad y temperatura con los cuales el silo pueda funcionar automática e independientemente.

CONCLUSIONES

Frente a la crisis agrícola que enfrenta nuestro país, que incluye al sistema poscosecha del maíz, el silo solar hexagonal constituye una oportunidad de cambio y una respuesta oportuna a la necesidad de acondicionar y conservar nuestras cosechas, tan importantes para nuestro esquema alimentario y nuestra soberanía misma. La adopción o no de nuevas estructuras de almacenamiento de granos dependerá sin embargo de la voluntad política de los grupos dirigentes de la cambiante economía agrícola.

El silo es una unidad versátil, adecuada a las necesidades de cualquier de cualquier tipo de productor (pequeño o grande, campesino o industrial), en capacidad, facilidad de carga y descarga, posibilidad de control de plagas, acceso al transporte, y costos de construcción y operación.

La evaluación teórica del silo solar hexagonal es útil para predecir con buena aproximación los tiempos de secado, la humedad máxima a la que el grano puede introducirse al silo para ser secado sin que exista peligro de deterioro, la potencia del ventilador para la distribución de aire y el costo de operación del silo.

Gracias al sistema de distribución de aire y calentamiento solar, se puede secar maíz en el silo solar hexagonal en un tiempo entre 10 y 15 días con secado continuo día y noche, según el clima prevaleciente, el cual determina la humedad relativa y la temperatura del aire para el secado.

Como el tiempo de secado no debe de exceder 15 días por seguridad, la capacidad de secado es, desafortunadamente, limitada por la humedad inicial del grano que no debe exceder 30-32 %a.s. (24% b.h.), y por lo tanto maíz más húmedo (como el recién cosechado) debe pre-secarse al menos hasta esa humedad.

Otra limitante es la potencia del ventilador. Si se quiere un secado rápido (en no más de 10 días y con un gasto mayor a $4\text{m}^3/\text{min.ton}$), el ventilador debe ser muy potente y por lo tanto la inversión en equipo demasiado grande. Por otro lado, si se quiere un secado más lento, el riesgo de deterioro biológico del grano se incrementa. Aún así, el secado solar representa una alternativa ecológica y muy económica, dado que sólo se opera un ventilador durante algunos días en todo el año.

El secado con calentamiento solar en el día es mucho más eficiente que el secado con aire natural (sin calentar) ya que la cantidad de humedad retirada puede ser hasta 80% mayor.

Secar durante la noche, aunque menos eficiente, reduce de 30 a 50% el tiempo total de secado, pero a expensas de un gasto de 30 a 70% (según el clima) mayor de energía por operación del ventilador. Sin embargo secar en la noche se recomienda porque el grano alcanza una humedad segura en un tiempo razonable y se evita el riesgo de crecimiento de hongos.

Es posible dar seguimiento al secado del grano en el silo verificando las condiciones de salida del aire, la temperatura al interior del silo, o la humedad del grano de la superficie. El secado del grano puede darse por terminado cuando:

- la humedad relativa del aire de salida alcanza un mínimo y se mantiene constante.
- la temperatura al interior del silo se mantiene en un rango no mayor a 5°C de diferencia en cualquier punto.
- el grano de las capas superiores, las más alejadas a la entrada de aire, alcanzan una humedad segura para el almacenamiento (15% b.s., 13% b.h.).

La conservación de la calidad del grano es el objetivo primordial del silo y para ello cuenta con diversas opciones: si el silo es pequeño puede hacerse hermético, se puede aplicar fumigante o algún tratamiento anti-plagas correctivo o preventivo (ácido, etc.) gracias al sistema de distribución de aire, la aireación periódica mantiene la temperatura del grano debajo de un límite dado, y mantiene los niveles de humedad deseados. Incluso un silo equipado con sensores de temperatura y/o humedad puede ser automatizado y volverse totalmente autosuficiente.

Aunque gran parte del estudio realizado se enfocó a la poscosecha del maíz, el silo solar hexagonal bien puede utilizarse para el secado y almacenamiento de otros granos de importancia tales como trigo, arroz y sorgo.

REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA.

- ¹ Turrent A., en el foro *La alimentación del futuro*, PUAL-UNAM, 21-22 de noviembre 1996.
- ² Datos del web de la FAO (octubre 1996): <http://apps.fao.org/cgi-bin/nph-db.pl>
- ³ Moreno E., 1995. *Almacenamiento y conservación de granos en el medio rural*, en El sistema poscosecha de granos en el nivel rural: problemática y propuestas, PUAL, México, pp. 247-262.
- ⁴ Carvajal R., en el foro *La alimentación del futuro*, PUAL-UNAM, 21-22 de noviembre 1996.
- ⁵ Appendini K., 1993. *Los productores campesinos*, en Alternativas para el campo mexicano, Distribuciones Fontamara S.A., PUAL-UNAM, Fundación Friedrich Ebert, México, pp. 88.
- ⁶ Arias C., 1995. *Almacenamiento de granos en Latinoamérica*, en El sistema poscosecha de granos en el nivel rural: problemática y propuestas, PUAL, México, pp. 233-246.
- ⁷ Calva J.L., 1993. *Alternativas para el campo mexicano*, Distribuciones Fontamara S.A., PUAL-UNAM, Fundación Friedrich Ebert, México, pp.79.
- ⁸ Torres F., 1995. *El sistema poscosecha y la alimentación nacional*, en El sistema poscosecha de granos en el nivel rural: problemática y propuestas, PUAL, pp.181-200
- ⁹ Chías J.L., Gasca J., 1995. *Participación del Sistema Nacional de Transporte en la distribución de granos* en El sistema poscosecha de granos en el nivel rural: problemática y propuestas, PUAL, pp.201-224.
- ¹⁰ Dato de la FAO actualizado en 1997 (<http://apps.fao.org/cgi-bin/nph-db.pl>).
- ¹¹ Datos del periódico Reforma, 24 de mayo 1996.
- ¹² AGRO-SINTESIS, 31 de diciembre 1995, edit. Año dos mil, México, pp 7.
- ¹³ Carabias J. y Provencio E., 1993. *Hacia un modelo de desarrollo agrícola sustentable*, en Calva J.L., "Alternativas para el campo mexicano", distribuciones Fontamara S.A., PUAL-UNAM, Fundación Friedrich Ebert, México, pp. 58.
- ¹⁴ Multon J.L. 1988. *Preservation and storage of grains, seeds and their by-products*. Lavoisier Publishing Inc., NY USA., pp 3-4, 18, 50-52.
- ¹⁵ Turrent A., 1993. *Aprovechamiento de la tierra de labor, tecnologías y posibilidades de autosuficiencia alimentara*, en Calva J.L., "Alternativas para el campo mexicano", distribuciones Fontamara S.A., PUAL-UNAM, Fundación Friedrich Ebert, México, pp. 99.

- ¹⁶ Iturriaga J.N., 1995. *La comercialización de granos básicos: maíz y frijol*, en El sistema poscosecha de granos en el nivel rural: problemática y propuestas, PUAL, México, pp 177-180.
- ¹⁷ Arias C., 1993. *Manual de manejo poscosecha de granos a nivel rural*. Oficina Regional de la FAO para América Latina y el Caribe. Santiago, Chile., pp.14-26, 55,60,98-111.
- ¹⁸ Brooker D. B., Bakker-Arkema F.W., Hall C.W. 1992. *Drying and storage of grains and oilseeds*. AVI Publishing Co., USA, pp 1-5, 77, 78, 390-393, 395-402
- ¹⁹ Juarez de Sousa e S. 1995. *Pré-processamento de produtos agrícolas*, 1a. edición, Depto. editorial Instituto Maria. Brasil, 1995, pp 57-72, 145-161.
- ²⁰ Badui S., 1993. *Química de los alimentos*, 3a. edición, edit. Alhambra Mexicana, México, pp 28-30.
- ²¹ Christensen C.M., Kaufmann H.H., 1969. Grain Storage. *The role of fungi in quality loss*. University of Minnesota Press, Minneapolis, USA.
- ²² Moreno E., Christensen C.M., 1971. *Efecto de la humedad y hongos sobre la viabilidad del maíz almacenado*, Rev. Lat. Amer. Microbiol., 1:115-121.
- ²³ Valle P., 1991. *Toxicología de alimentos*, 2a. edición, ECO-OPS, OMS, México, pp 14-16.
- ²⁴ Diener U.L., Davis N.D., 1987. *Biology of Aspergillus flavus and A. parasiticus*, en Zuber M.S. et al. (eds.) *Aflatoxin in maize*, Proceedings of the workshop, CIMMYT, México.
- ²⁵ Leiato J. et. al., 1989. *Production of aflatoxin B by Aspergillus ruber*, Thom and Church, Mycopathologia, 108: 135-138.
- ²⁶ Talbot M.T. & Koehler P. 1991. *Pest management strategies for storing grains in Florida*. University of Florida Cooperative Extension Service, USA, pp 1-27.
- ²⁷ Aguilera M., 1992. *Compatibilidad de polvos vegetales y minerales con la actividad entomopatógena de Bacillus thuringiensis sobre Ephesia cautella (Walker)*. En memorias de la III reunión nacional de la problemática de poscosecha de granos y semillas y del taller de evaluación de pérdidas poscosecha de granos básicos, AMEXPOGRASE 1994, pp 112-120.

-
- ²⁸ Mazaud F., 1995. *Acerca del programa de prevención de pérdidas poscosecha de alimentos de la FAO*, en El sistema poscosecha de granos en el nivel rural: problemática y propuestas, PUAL, México, pp. 20.
- ²⁹ Hall C. W. 1980. *Drying and Storage of Agricultural Crops*. AVI Publishing Company INC, USA, pp 58-62, 291-309
- ³⁰ Talbot M.T. 1988. *Grain drying and storage on Florida farms*. Florida Cooperative Extension Service, Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida, USA, pp 1-19.
- ³¹ Sauer D.B. (editor). 1992. *Storage of cereal grains and their products*. 4a edición, American Association of Cereal Chemists Inc., St. Paul, Minnesota, USA, pp 213, 228-244.
- ³² Talbot M.T. & Elfino K, 1981. *Agricultural engineering fact sheet*. No. AE33-AE40. Florida Cooperative Extension Service, Institute of Food and Agricultural Sciences. University of Florida.
- ³³ Talbot M.T. 1993. *Management of stored grains with aeration*. Circular 1104, Agricultural Engineering Department, Florida Cooperative Extension Service, Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida, USA, pp 1-8.
- ³⁴ Douglass M.P., 1994. *Grain storage in the tropics-the change from bag to bulk*. Postharvest News and Information, 5 (3) 30N-32N
- ³⁵ Moreira R.G., Bakker-Arkema F.W. 1992. *Grain dryer controls: a review*. Cereal Chemistry, vol. 69, no. 4, pp 390-396.
- ³⁶ Talbot M.T. 1985. *High Moisture Grain Storage*. Bulletin 225, Florida Cooperative Extension Service, University of Florida, Gainesville, USA, pp1-13.

Otras obras consultadas:

- Charley Helen. 1990. *Preparación de alimentos*. Editorial Limusa. México D.F., pp. 189-191.
- Hernández G., Morano H.R., Sosa L.G. 1995. *Secado y aireación solar en un silo hexagonal*. Tesis, Facultad de Ingeniería, UNAM, pp 21-24.
- Kent N.L. 1987. *Tecnología de los cereales*. 3a edición, editorial Acribia, España, pp. 1-3, 10-11, 194.

NORMA OFICIAL MEXICANA

NOM-FF-34-1982

Productos Alimenticios no industrializados para uso humano-cereales-maíz (*Zea mays*) especificaciones.

1 Objetivo y campo de aplicación:

Esta Norma de Calidad Mexicana establece las condiciones y características que debe reunir el maíz (*Zea mays*) en todas sus variedades, una vez desgranado, para poder ser objeto de comercialización en el territorio nacional.

2 Definiciones

2.1 Maíz:

Es un cereal perteneciente a la familia de las gramíneas, clase monocotiledóneas especie *Zea mays*.

2.2 Maíz blanco:

Se considera maíz blanco aquel que corresponde a este color y que no presenta más de 5% de maíces amarillos, y no más del 3% de maíces oscuros (rojos, anaranjados, azules y morados), un ligero tinte cremoso, pajizo o rosado no es obstáculo para su clasificación.

2.2.1 Maíz blanco mezclado No. 1:

Se considera maíz blanco mezclado No. 1 todo aquel maíz blanco que contiene entre 5.1% y 10% de maíces amarillos.

2.2.2 Maíz blanco mezclado No. 2:

Se considera maíz blanco mezclado No. 2 todo aquel maíz blanco que contiene entre 10.1% y 20% de maíces amarillos.

2.2.3 Cualquier mezcla de maíces blancos que rebase el 20% de maíces amarillos, debe ser considerada como maíz amarillo.

No es obstáculo para clasificar el maíz dentro de los tipos mezclados No. 1 y 2, cuando presenta hasta un 3% de granos oscuros.

2.3 Maíz amarillo aquel que corresponde a este color y que contiene hasta un 5% de maíces oscuros, con excepción de maíces morados, que en su caso, es de 4% máximo.

2.4 Maíz pinto:

Se considera maíz pinto a todo aquel maíz blanco o mezclado que contiene más de un 3% y/o al amarillo que contiene más de un 5% de maíces oscuros.

(En caso de mezcla de amarillos con morados, se considera maíz pinto si el porcentaje de oscuros rebasa el 4%).

2.5 Los porcentajes mencionados en esta norma se refieren exclusivamente a porcentajes en peso.

3 Defectos

Impurezas:

Se consideran impurezas los granos, partes de estos y cualquier otro cuerpo o materia extraña distintas del maíz que pase a través de una criba o cedazo de 4.76 mm así como otras materias o cuerpos distintos del maíz que queden en la muestra ya cribada.

4 Daños

4.1 Granos dañados:

Se consideran granos dañados todos aquellos granos y partes de grano de maíz dañados por calor, insectos, microorganismos, roedores, germinados, dañados en el campo por accidentes climatológicos o dañados por cualquier otra causa.

4.1.1 Granos dañados por calor:

Son aquellos granos de maíz que presentan una coloración café oscura que afecta tanto al embrión como al endospermo.

4.1.2 Granos dañados por insectos:

Son aquellos granos de maíz que presentan perforaciones y galerías originadas por insectos de almacén y/o campo.

4.1.3 Granos dañados por microorganismos que producen toxinas:

Son aquellos granos de maíz que presentan coloraciones anormales que afecta al embrión y presenta esporas bajo observación al microscopio v. gr. *Aspergillus flavus* y otras especificadas por la autoridad competente.

4.2 Granos quebrados:

Son aquellos granos que carecen parcial o totalmente de alguna de sus partes.

5 Clasificación:

El maíz (*Zea mays*) se clasifica en los siguientes grados:

5.1 México

5.2 Grado muestra no clasificado

6 Especificaciones de grados de calidad

6.1 El maíz para todos los grados de calidad, debe estar sano, seco y limpio.

6.2 Granos quebrados:

Se aceptará maíz calidad México con un porcentaje del 1% al 2% como máximo sin percibir ni bonificación ni deducción.

Estableciéndose que si este porcentaje es rebasado se deducirán 500 grs. por cada décima rebasada o se bonifican 500 grs. por cada décima menor que el 1%.

6.3 Granos dañados por calor:

Se aceptará un máximo de 4%

6.4 Granos dañados por insectos:

Se aceptará un máximo de 5.5%

TABLA No. 1

Bonificaciones y deducciones para maíz de acuerdo al porcentaje establecido de grano quebrado*

Grano quebrado	Bonificaciones
%	Kg / ton
0.0	5.000
0.1	4.500
0.2	4.000
0.3	3.500
0.4	3.000
0.5	2.500
0.6	2.000
0.7	1.500
0.8	1.000
0.9	0.500
1.0	-

* Porcentajes mayores al 2% caerán dentro de la calidad grado muestra

TABLA No. 2

Bonificaciones y deducciones para maíz de acuerdo al porcentaje establecido de grano dañado (del 5.0% al 10.0%)

Grano dañado	Bonificaciones	Grano dañado	Deducciones
%	Kg / ton	%	Kg / ton
4.0	2.500	9.9	-
4.1	2.250	10.0	-
4.2	2.000	10.1	0.250
4.3	1.750	10.2	0.500
4.4	1.500	10.3	0.750
4.5	1.250	10.4	1.000
4.6	1.000	10.5	1.250
4.7	0.750	10.6	1.500
4.8	0.500	10.7	1.750
4.9	0.250	10.8	2.000
5.0	-	10.9	2.250
5.1	-	11.0	2.500

6.2 Humedad

6.2.1 es el agua que contiene el producto, convencionalmente y para fines de esta norma, se considera como humedad la determinación, expresada en porcentaje, base seca realizada por cualquier método, con una precisión mínima de más menos 0.1%.

6.2.2 Entre el 12% y 14% de humedad el lote o partida de grano no tendrá bonificaciones o deducción alguna. En caso de que este factor varíe deberá bonificarse o deducirse 1.16 Kg/ton por cada décima que descienda o aumente, respectivamente.

(Ver tabla No. 3).

6.3 El lote o partida de grano que contenga hasta el 1.0% de impurezas no tendrá ni bonificación o deducción alguna. En caso de variar este factor se bonificará o deducirá 1.01 Kg/ton por cada décima que aumente (deducción) o disminuya (bonificación).

(Ver tabla No. 4).

6.4 Grado muestra no clasificado:

Lo constituye el maíz que excede las tolerancias establecidas para el grado de calidad México, o presente olor a moho, fermentación o putrefacción o cualquier olor comercialmente objetable; que contenga piedras, vidrios, excretas de roedores, o por cualquier otro concepto baje su calidad.

Este producto podrá ser comercializado libremente en territorio nacional mediante acuerdo entre las partes sobre la calidad del mismo.

6.5 Este producto está sujeto a los reglamentos que en materia sanitaria han establecido las Secretarías de Salubridad y asistencia y la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos.

TABLA No.3

Humedad %	Bonificación Kg / ton	Humedad %	Bonificación Kg / ton
0.1	138.04	4.6	85.84
0.2	136.88	4.7	84.68
0.3	135.72	4.8	83.52
0.4	134.56	4.9	82.36
0.5	133.40	5.0	81.20
0.6	132.24	5.1	80.04
0.7	131.08	5.2	78.88
0.8	129.92	5.3	77.72
0.9	128.76	5.4	76.56
1.0	127.60	5.5	75.40
1.1	126.44	5.6	74.24
1.2	125.28	5.7	73.08
1.3	124.12	5.8	71.92
1.4	122.96	5.9	70.76
1.5	121.80	6.0	69.60
1.6	120.64	6.1	68.44
1.7	119.48	6.2	67.28
1.8	118.32	6.3	66.12
1.9	117.16	6.4	64.96
2.0	116.00	6.5	63.80
2.1	114.84	6.6	62.64
2.2	113.68	6.7	61.48
2.3	112.52	6.8	60.32
2.4	111.36	6.9	59.16
2.5	110.20	7.0	58.00
2.6	109.04	7.1	56.84
2.7	107.88	7.2	55.68
2.8	106.72	7.3	54.52
2.9	105.56	7.4	53.36
3.0	104.40	7.5	52.20
3.1	103.24	7.6	51.04
3.2	102.08	7.7	49.88
3.3	100.92	7.8	48.72
3.4	99.76	7.9	47.56
3.5	98.60	8.0	46.40
3.6	97.44	8.1	45.24
3.7	96.28	8.2	44.08
3.8	95.12	8.3	42.92
3.9	93.96	8.4	41.76
4.0	92.80	8.5	40.60
4.1	91.64	8.6	39.44
4.2	90.48	8.7	38.28
4.3	89.32	8.8	37.12
4.4	88.16	8.9	35.96
4.5	87.00	9.0	34.80

Humedad %	Bonificación Kg / ton	Humedad %	Deducción Kg / ton
9.1	33.64	13.6	
9.2	32.48	13.7	Ni deduce.
9.3	31.32	13.8	
9.4	30.16	13.9	Ni bonif.
9.5	29.00	14.0	
9.6	27.84	14.1	-1.16
9.7	26.68	14.2	-2.32
9.8	25.52	14.3	-3.48
9.9	24.36	14.4	-4.64
10.0	23.20	14.5	-5.80
10.1	22.04	14.6	-6.96
10.2	20.88	14.7	-8.12
10.3	19.72	14.8	-9.28
10.4	18.56	14.9	-10.44
10.5	17.40	15.0	-11.60
10.6	16.24	15.1	-12.76
10.7	15.08	15.2	-13.92
10.8	13.92	15.3	-15.08
10.9	12.76	15.4	-16.24
11.0	11.60	15.5	-17.40
11.1	10.44	15.6	-18.56
11.2	9.28	15.7	-19.72
11.3	8.12	15.8	-20.88
11.4	6.96	15.9	-22.04
11.5	5.80	16.0	-23.20
11.6	4.64	16.1	-24.36
11.7	3.48	16.2	-25.52
11.8	2.32	16.3	-26.68
11.9	1.16	16.4	-27.84
12.0		16.5	-29.00
12.1	N N	16.6	-30.16
12.2	i i	16.7	-31.32
12.3		16.8	-32.48
12.4	d b	16.9	-33.64
12.5	e o	17.0	-34.80
12.6	d n	17.1	-35.96
12.7	u i	17.2	-37.12
12.8	c f	17.3	-38.28
12.9	e i	17.4	-39.44
13.0	i e	17.5	-40.60
13.1	ó a	17.6	-41.76
13.2	n e	17.7	-42.92
13.3	i	17.8	-44.08
13.4	ó	17.9	-45.24
13.5	n	18.0	-46.40

TABLA No. 4

BONIFICACIONES O DEDUCCIONES PARA MAÍZ
DE ACUERDO AL 1.0% DE IMPUREZAS

El factor de bonificación o deducción es de 1.01 Kg/ton.

Impurezas %	Bonificación Kg / ton
0.1	9.09
0.2	8.08
0.3	7.07
0.4	6.06
0.5	5.05
0.6	4.04
0.7	3.03
0.8	2.02
0.9	1.01
1.0	0.00
1.1	-1.01
1.2	-2.02
1.3	-3.03
1.4	-4.04
1.5	-5.05
1.6	-6.06
1.7	-7.07
1.8	-8.08
1.9	-9.09
2.0	-10.10

NOTA: Esta norma está sujeta a los ajustes necesarios que se requieran para su correcta aplicación práctica y de las aportaciones de los sectores involucrados.

México, D.F., a 28 de enero de 1982.-El Director General de Normas Comerciales de la Secretaría de Comercio, Héctor Vicente Bayardo Moreno.-Rúbrica.-El Director General de Normas, Román Serra Castaños.-Rúbrica.

Carta psicrométrica.

Unidades S.I.
 Temperatura normal,
 al nivel del mar,
 presión barométrica 101.325 kPa.

