



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
CUAUTILÁN**

**EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO FÍSICO Y  
QUÍMICO DE LA POLIACRILAMIDA CATIONICA  
GRANO MEDIO Y SUS EFECTOS EN SUELOS  
AGRÍCOLAS.**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER ÉL TÍTULO DE:**

**INGENIERA AGRÍCOLA  
P R E S E N T A:**

**GABRIELA SÁNCHEZ GÓMEZ**

**ASESOR: DR. ARTURO AGUIRRE GÓMEZ.**

**CUAUTILÁN IZCALLI, EDO. DE MÉXICO**

**2006**



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.

## **AGRADECIMIENTOS:**

A la UNAM, a la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, principalmente a la carrera de Ingeniería Agrícola, por la oportunidad que me brindaron de cursar una carrera universitaria.

Al Dr. Arturo Aguirre Gómez, por la acertada dirección de este trabajo; pero además por el apoyo otorgado para realizarlo.

Al MC. Roberto Guerrero Agama, por su apoyo incondicional hasta los últimos momentos de esta investigación.

Al MC. Edvino Josafat, al Ing. Salvador del Castillo y al Ing. Raúl Espinoza, por sus importantes comentarios y consejos que en su momento me brindaron para la realización de mi tesis profesional.

A la empresa Quetzalcoatl Sistemas, S.A. de C.V., por el material y la información proporcionada para la realización de este trabajo.

## **DEDICATORIAS:**

A mi madre:

Por su apoyo y confianza, por todo lo que ha hecho por mí y sobre todo por enseñarme la nobleza de apreciar el valor de las cosas, con fortaleza hacer frente a las adversidades sin doblegarse.

A José Santos:

Cariñosamente por apoyarme y alentarme a terminar mi tesis, sin él, no hubiese tenido la inspiración y la decisión de culminar mi trabajo.

A mi cuñado Arturo Rodríguez:

Por el apoyo incondicional que me brindó durante el desarrollo de este trabajo, pero sobre todo por su ejemplo que me motivó a culminar la meta propuesta.

A mi familia:

A los cuales les debo el cariño y el apoyo que me han brindado durante todo este tiempo.

## **ÍNDICE**

**Índice de figuras**

**Índice de cuadros**

**Índice de cuadros del apéndice**

**Resumen**

**Objetivos e Hipótesis**

**I INTRODUCCIÓN .....1**

### **1.1 PROBLEMÁTICA DEL SISTEMA AGUA-PLANTA**

- 1.1.1 Importancia del agua en la agricultura .....2
- 1.1.2 El agua como factor limitante en la agricultura .....2

### **1.2 RELACIÓN AGUA-PLANTA**

- 1.2.1 Procesos básicos .....3
- 1.2.2 Potencial hídrico .....4
- 1.2.3 Osmosis .....5
- 1.2.4 Adsorción e imbibición .....6
- 1.2.5 El balance del agua .....6
- 1.2.6 Absorción de agua por las raíces .....7
- 1.2.7 Estrés hídrico .....9
- 1.2.8 Desarrollo del estrés hídrico .....9
- 1.2.9 Salinidad .....10

### **1.3 MANEJO DEL AGUA EN EL SUELO**

- 1.3.1 Balance hídrico .....11
- 1.3.2 Factores que afectan la retención de agua en el suelo.....12
- 1.3.3 Retención de agua en el suelo.....13
- 1.3.4 Plásticos en la agricultura .....14
- 1.3.5 Conservación y captación de humedad en el suelo.....15
- 1.3.6 Almacenamiento de agua.....16

### **1.4 LAS POLIACRILAMIDAS EN LA AGRICULTURA**

- 1.4.1 Principios básicos de uso .....19
- 1.4.2 Tipos de poliacrilamida (PAM).....19
- 1.4.3 Naturaleza química de la poliacrilamida (PAM) .....20
- 1.4.4 Propiedades físico-químicas de la poliacrilamida (PAM).....21
- 1.4.5 Usos comerciales de la poliacrilamida (PAM) .....22
- 1.4.6 Usos en la agricultura de los polímeros .....23
- 1.4.7 Importancia de la poliacrilamida (PAM) .....24
- 1.4.8 Ventajas y desventajas del uso de polímeros .....25
- 1.4.9 Efectos en la retención de humedad .....25

## 1.5 INVESTIGACIONES RECIENTES DE LA POLIACRILAMIDA

1.5.1 Efecto de la PAM, en la estructura del suelo .....	27
1.5.2 Influencia en la retención de humedad .....	27
1.5.3 Utilización en la rehabilitación de suelos afectados por sales .....	28
1.5.4 Aplicación de la PAM con fertilizantes .....	28

## II MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 UBICACIÓN DEL EXPERIMENTO .....	29
-------------------------------------	----

2.2 MATERIALES .....	29
----------------------	----

2.2.1 Materiales .....	29
2.2.2 Planta de brócoli .....	29
2.2.3 Otros materiales .....	29
2.2.4 Reactivos .....	30

### 2.3 MÉTODOS DE ESTUDIO

2.3.1 Caracterización físico-química y estudios cinéticos	
2.3.1.1 Capacidad de Intercambio catiónico .....	30
2.3.1.2 Cinética de absorción-retención de agua por la PAM .....	30
2.3.1.3 Cinética de liberación o pérdida de agua por la PAM .....	32

2.3.2 Estudios de cinética de retención-pérdida de humedad por los sistemas suelo-PAM-planta: Punto de marchitez permanente.....	32
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

2.4 DISEÑO EXPERIMENTAL .....	33
-------------------------------	----

## III RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIÓNICO .....	35
----------------------------------------------	----

### 3.2 CINÉTICA DE ABSORCIÓN DE AGUA POR LA PAM

3.2.1 Sistema PAM-agua .....	35
3.2.2 Sistema PAM-agua-HCl .....	36
3.2.3 Sistema PAM-agua-KCl .....	37
3.2.4 Sistema PAM-fertilizantes	
3.2.4.1 Nitrato de amonio .....	38
3.2.4.2 Sulfato de amonio .....	39
3.2.4.3 Ácido fosfórico .....	40

### 3.3 CINÉTICA DE LIBERACIÓN O PÉRDIDA DE AGUA POR LA PAM



## Índice de figuras

Figura		Pág.
1	Entrada del agua a la célula.....	5
2	Mecanismo por medio del cual el agua es traslocada del suelo a la planta y luego a la atmósfera.....	7
3	Absorción de agua por las raíces.....	7
4	Movimiento del agua desde la solución del suelo a los tejidos vasculares..	9
5	Estructura química de la PAM.....	20
6	Grupo funcional amida.....	20
7	Arreglo de los tratamientos dentro del invernadero.....	34
8	Ubicación del experimento dentro del invernadero.....	34
9	Gráficas de absorción de agua por la PAM.....	35
10	Gráficas de cinética de absorción de agua por la PAM en presencia de HCl.....	36
11	Gráficas de cinética de absorción de agua por la PAM en presencia de KCl.....	37
12	Gráficas de absorción de agua por la PAM con presencia de Nitrato de amonio.....	38
13	Gráficas de absorción de agua por la PAM en función del fertilizante Sulfato de amonio. ....	39
14	Gráficas de absorción de agua por la PAM en función del fertilizante Ácido fosfórico.....	40
15	Gráficas de las pérdidas de agua por la PAM.....	41

16	Gráficas de liberación de humedad de la PAM en Arena de río.....	42
17	Gráficas de liberación de humedad de la PAM en un suelo arcilloso (Vertisol).....	43
18	Gráficas de liberación de humedad de la PAM en un suelo oxídico (Luvisol).....	44
19	Gráficas de liberación de humedad de la PAM en un suelo Salino-alcálico (Solonetz).....	45
20	Gráficas de porcentaje de humedad por la PAM en arena de río con presencia de planta.....	47
21	Gráficas de porcentaje de humedad por la PAM en suelo arcilloso (Vertisol) con presencia de planta.....	49
22	Gráficas de porcentaje de humedad por la PAM en un suelo oxídico (Luvisol) con presencia de planta.....	50

## Índice de cuadros

Figura		Página
<b>A-1</b>	ANOVA del porcentaje de humedad en arena de río con mezcla de PAM.....	47
	....	
A-2	Separación de medias a través de la prueba de Tukey del porcentaje de humedad en arena de río con mezcla de PAM.....	47
A-3	ANOVA de porcentaje de humedad en suelo arcilloso (Vertisol) con mezcla de PAM.....	49
A-4	Separación de medias a través de la prueba de Tukey del porcentaje de humedad en suelo arcilloso (Vertisol) con mezcla de PAM.....	49
A-5	ANOVA del porcentaje de humedad en suelo oxídico (Luvisol) con mezcla de PAM.....	51
A-6	Separación de medias a través de la prueba de Tukey del porcentaje de humedad en suelo oxídico (Luvisol) con mezcla de PAM.....	51
A-7	ANOVA de la altura final de la planta de brócoli en arena de río con mezcla de PAM.....	52
A-8	Separación de medias a través de la prueba de Tukey de la altura final de la planta en arena de río con mezcla de PAM.....	52
	ANOVA de la altura final de la planta de brócoli en suelo arcilloso	

A-9	(Vertisol) con mezcla de PAM.....	52
A-10	Separación de medias a través de la prueba de Tukey de la altura final de la planta en suelo arcilloso (Vertisol) con mezcla de PAM.....	53
A-11	ANOVA de altura final de la planta de brócoli en suelo oxídico (Luvisol) con mezcla de PAM.....	53
A-12	Separación de medias a través de la prueba de Tukey de la altura final de la planta en suelo oxídico (Luvisol) con mezcla de PAM.....	53
A-13	ANOVA de la cantidad final de hojas de la planta de brócoli en arena de río con mezcla de PAM.....	54
A-14	Separación de medias a través de la prueba de Tukey de la cantidad final de hojas en arena de río con mezcla de PAM.....	54
A-15	ANOVA de la cantidad final de hojas de la planta de brócoli en suelo arcilloso (Vertisol) con mezcla de PAM.....	54
<b>A-16</b>	Separación de medias a través de la prueba de Tukey de la cantidad final de hojas de la planta de brócoli en suelo arcilloso (Vertisol) con mezcla de PAM.....	54
<b>A-17</b>	ANOVA de la cantidad final de hojas de la planta de brócoli en suelo oxídico (Luvisol) con mezcla de PAM.....	55
<b>A-18</b>	Separación de medias a través de la prueba de Tukey de la cantidad final de hojas de la planta de brócoli en un suelo oxídico (Luvisol) con mezcla de PAM.....	55

*Índice de cuadros del apéndice.*

Cuadro		Pág.
A-1	Cantidad de agua absorbida por 1g de PAM.....	62
A-2	Pérdidas de humedad en 1 g de PAM.....	62
A-3	Cantidad de absorción de agua por el PAM en presencia de HCl en concentraciones 0.01N, 0.1N y 1N (en 250ml de solución).....	63
A-4	Cantidad de absorción de agua por la PAM en presencia de KCl en concentraciones 0.01N, 0.1N y 1N (en 250ml de solución).....	64
A-5	Punto de saturación de cuatro suelos (Arena de río, Vertisol, Luvisol y Salino-alcálico) con tres dosis de PAM en presencia de un testigo, utilizando 300g de suelo para cada uno.....	65
A-6	Cantidad de absorción de agua por la PAM en presencia de KNO <sub>3</sub> en concentraciones (alta, media y baja) en 250 ml de solución.....	67
A-7	Cantidad de absorción de agua por la PAM en presencia de H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> en concentraciones (alta, media y baja) en 250 ml de solución.....	68
A-8	Cantidad de absorción de agua por la PAM en presencia de (NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> en concentraciones (alta, media y baja) en 250 ml de solución.....	69
A-9	Cinética de liberación de humedad con tres dosis de PAM, en cuatro suelos.....	70
A-10	Datos de % de humedad con dosis de PAM (alta, media, baja y testigo) en tres tipos de suelos con presencia de planta de brócoli bajo condiciones de invernadero.....	74
A-11	Datos promedio del número de hojas en las plantas de brócoli bajo condiciones de invernadero.....	77
A-12	Datos promedio de la altura de las plantas de brócoli bajo condiciones de invernadero.....	77

## **Resumen**

Actualmente el agua es un factor esencial y limitante en la producción agrícola, por tal motivo se están buscando alternativas técnicas de conservación y aprovechamiento de este recurso; a través de sistemas de riego presurizados, de polímeros absorbentes (Poliacrilamidas), de acolchados y captación de agua de lluvia, entre otras. De las técnicas antes mencionadas se tienen pocos estudios sobre el uso y manejo de las poliacrilamidas en la conservación y aprovechamiento del agua en la agricultura. Por lo anterior el propósito del siguiente trabajo tuvo como finalidad evaluar, en dos etapas, el desempeño de las Poliacrilamidas. La primera inició, vía estudios de laboratorio que incluyen pruebas de comportamiento físico (e.g. incremento en la retención de humedad) y químico (e.g. aumento en la capacidad de intercambio catiónico) de la Poliacrilamida catiónica, (PAM) de grano medio. Se realizaron estudios de velocidad de absorción (velocidad de absorción) y de liberación de agua en suelos con diferentes propiedades, y conteniendo PAM, y sales fertilizantes. De las pruebas de absorción efectuadas en laboratorio se obtuvieron máximos de retención de agua destilada de  $168 \text{ g}^{-1}$  en los expuestos con PAM pura. El aumento de la acidez y la salinidad (adicionada en forma de fertilizantes) tuvo efectos de disminución en la absorción de agua por la PAM al reducir su capacidad de retención. En la capacidad de intercambio catiónico se obtuvo un valor de 3.6 mmol en la PAM pura. Las pruebas efectuadas con suelos o sustratos (Arena de río, suelo Vertisol, suelo Luvisol y suelo Salino-alcálico) fueron realizadas con tres concentraciones diferentes de PAM. La pérdida de humedad por evaporación fue seguida por 40 días. El efecto de la PAM en la dosis baja fue menor que en la dosis media y alta, en términos de mayor absorción y menor tipo de liberación de agua de acuerdo con lo citado en la literatura de (Lara, 1993). Los datos obtenidos, se utilizaron como indicadores para realizar la segunda etapa del trabajo.

La segunda etapa consistió de trabajo en invernadero, utilizando como planta indicadora el cultivo de brócoli, debido principalmente a la época en la que se estableció el experimento (invierno, resistencia a las bajas temperaturas), al corto período de crecimiento que presenta y a la susceptibilidad a la falta de agua. Este experimento nos sirvió para evaluar la eficacia de la PAM en las pérdidas de humedad al punto de marchitez permanente. Con tal fin se utilizó un diseño experimental en bloques completamente al azar, con cuatro tratamientos y 5 repeticiones, dando un total de 60 unidades experimentales. A los datos obtenidos se les efectuó un análisis de varianza (ANOVA), y las pruebas de hipótesis (con una significancia máxima de 0.05).

El experimento en invernadero se llevó a cabo con tres sustratos de diferentes características (Arena de río, suelo Vertisol y suelo Luvisol). Se inició con el trasplante y la adaptabilidad de la planta a condiciones de invernadero (1 mes de adaptabilidad).

Se midieron las variables de porcentaje de humedad en los suelos, altura de las plantas y el número de hojas. El período en el que se desarrolló el muestreo fue de 24 días, dos

muestreos por semana, en el cual el riego se suspendió totalmente para poder evaluar los porcentajes de humedad perdidos en cada muestreo. Al tiempo de mantener el desempeño del cultivo en términos visuales a juicio del experimentador.

En la variable a evaluar de porcentaje de humedad en suelos Luvisol, Vertisol y Arena de río en las concentraciones (alta 10g/2kg suelo, media 6.6g/2kg y baja 3.3g/2kg) existieron diferencias significativas al incrementarse el porcentaje de humedad en el sustrato de arena de río con la dosis alta de 59.34%, debido principalmente a que las plantas no presentaron un desarrollo óptimo al no contener elementos nutritivos en el suelo, por tal motivo la planta no perdió en cantidades elevadas el agua, reduciéndose de esta manera las pérdidas de humedad y prolongándola por más tiempo, en comparación con el testigo. Mientras que para el suelo Vertisol no se manifestó ninguna diferencia significativa entre los tratamientos, esto pudo deberse a que en este sustrato hubo la mayor tasa de evapotranspiración debido a que el suelo contenía materia orgánica que contribuyó a proporcionar elementos de nutrición a las plantas y con ello a incrementar el tamaño de las hojas y por lo tanto incrementarse también las pérdidas de agua por este mecanismo. En cuanto al suelo Luvisol se obtuvo un contenido de agua de 36.7% para las dosis alta y media, esto se debió principalmente a que en este sustrato el crecimiento de la planta fue limitado todo el tiempo, pues se redujo la estimulación y diferenciación de raíces provocando que las pérdidas de humedad por evapotranspiración disminuyera, conduciendo a la muerte prematura de la planta.

Las mezclas de PAM-suelo no mostraron efectos significativos estadísticamente, en las variables de altura y número de hojas entre tratamientos. La diferencia se mostró en el vigor de las plantas, en el área foliar (parámetro no cuantificado pero evidencial), en el color verde, y en el tamaño de las hojas (parámetro no cuantificada pero evidencial), observándose que las hojas se manifestaron de color verde claro, pequeñas y no desarrolladas, los tallos muy delgados de un color rojizo.

## Objetivos e Hipótesis

### Objetivo General:

- Evaluar el comportamiento físico-químico de tres dosis de la Poliacrilamida catiónica (PAM), en cuatro tipos de suelo y determinar su efecto sobre la retención de humedad, es decir de su contenido de agua, en cada uno de ellos.

### Objetivos particulares:

1. Analizar el efecto de la acidez y la salinidad en la capacidad de absorción de agua por la Poliacrilamida pura.
2. Evaluar la influencia que tiene la aplicación del fertilizante sobre la retención de agua de los sustratos sin y con la aplicación de la Poliacrilamida.
3. Determinar la cinética ó velocidad de absorción y liberación de agua en tres diferentes dosis de Poliacrilamida catiónica aplicada en cuatro tipos de suelos
4. Determinar la capacidad de campo (CC) y el punto de marchitez (PMP) en las mezclas de suelo-Poliacrilamida-planta y el efecto de dicha poliacrilamida en la retención de agua.

### Hipótesis:

- 1) La hipótesis nula: La aplicación de PAM, la acidez y la salinidad no afectan la capacidad de absorción de los sustratos.
- 2) La retención de agua de las mezclas Poliacrilamida-suelo (sustrato) depende solamente de las características del suelo.
- 3) Las dosis de fertilización y tipo de fertilizante no afectan la absorción de agua de la PAM.
- 4) La Poliacrilamida aumenta el porcentaje del contenido de agua retenida en los suelos arenosos.

## I INTRODUCCIÓN

La creciente demanda de productos agrícolas exige el incremento de la producción. Esta difícil tarea requiere el empleo de las técnicas más apropiadas y principalmente de aquellas que más incidan en la productividad. La producción se incrementa de dos maneras; a) aumentando las áreas de cultivo, y b) aumentando la productividad de los cultivos.

El principal factor limitante de la producción agrícola es la escasa y erráticamente distribuida precipitación pluvial, lo cual ocasiona, junto con otros fenómenos agrometeorológicos como el granizo y las heladas, pérdidas de hasta 60% del total sembrado en algunos lugares del país como el Estado de Zacatecas, Durango y Chihuahua (Villareal, 2003).

Por otra parte, la falta de agua hace inefectivo, y muchas veces incoachable, el uso de varios insumos agrícolas considerados como importantes para el aumento de la productividad, principalmente los fertilizantes. Por lo tanto, es de gran importancia la utilización de materiales que mejoren el aprovechamiento de los fertilizantes y retengan la humedad en la rizósfera, que es la profundidad del suelo donde se encuentra la mayor parte de las raíces.

La naturaleza y la industria química aportan diversas sustancias con esas cualidades, entre ellas se cuenta con gran cantidad de materiales orgánicos de origen natural, como estiércoles, abonos verdes, residuos de cosechas, compostas, etc.; Además productos naturales, por ejemplo las Zeolitas, y de otros compuestos sintéticos que cumplen con esas exigencias, entre ellos algunos polímeros, como por ejemplo la poliacrilamida (PAM).

Debido a la falta de información científica de las propiedades de la Poliacrilamida y su beneficio en la conservación de humedad en suelos agrícolas, se pretende mediante este trabajo evaluar el comportamiento de las propiedades físico-químicas de la Poliacrilamida Catiónica (PAM). Para cuantificar las propiedades de retención de humedad, se utilizaron suelos y sustratos con diferentes características, empleando como planta indicadora brócoli, para así poder evaluar si los beneficios del producto son adecuados como para justificar su uso, en términos de mejorar la absorción y la retención de humedad en suelos agrícolas.

## 1.1 PROBLEMÁTICA DEL SISTEMA AGUA-PLANTA

### 1.1.1 Importancia del agua en la agricultura.

Los cultivos necesitan agua en cantidades adecuadas para poder sobrevivir y producir. Las plantas están constituidas en un 90% de agua en términos generales. En condiciones normales, 1 m<sup>2</sup> de vegetación transpira unos 5.5 L de agua al día, o sea, el cultivo de una hectárea pierde aproximadamente 55 m<sup>3</sup> de agua por día.

La planta solo puede aprovechar el agua del suelo cuando tiene a su disposición suficiente cantidad de aire. En otras palabras, la cantidad de agua y de aire en el suelo debe estar en cierto equilibrio para obtener un alto rendimiento de los cultivos. Por esto, el productor debe controlar el suministro y el flujo de agua en el suelo.

En casos de escasez, el productor debe suministrar agua por medio de sistemas de riego. En caso de exceso de agua, debe instalar sistemas de drenaje.

Para planear y ejecutar el control de agua, el productor debe, en primer lugar, conocer cuanta agua requiere el cultivo y cómo la absorbe. Además, es importante saber los períodos críticos en la demanda de agua por parte de la planta.

El tipo de suelo determina, en principio, la disponibilidad de agua para la planta. Pero la cantidad de agua en el suelo cambia continuamente. El agua disponible en la zona de raíces puede aumentar o disminuir por factores tales como la precipitación, la infiltración del agua de lluvia, el escurrimiento, la infiltración hacia el subsuelo, el movimiento capilar, la evaporación del suelo y naturalmente, por la transpiración de la planta.

Considerando estos factores, el productor debe decidir sobre las necesidades de riego y drenaje para efectuar un adecuado riego y drenaje de sus suelos (Manual, 1999).

### 1.1.2 El agua como factor limitante en la agricultura.

En la explotación agrícola el agua es un factor esencial. Sin duda se puede calificar este elemento como el factor limitante de mayor importancia en la producción agrícola mundial. Este elemento es el componente más importante de la planta, que es el vehículo de transporte de alimentos y elementos minerales, que es básico para mantener la turgencia celular y que participa en la mayoría de los procesos y reacciones químicas de la planta, ya sea directamente o como sustrato de las mismas. Los organismos autótrofos y son los únicos seres vivos que tienen la capacidad ó la aptitud de transformar las sustancias minerales en orgánicas.

La absorción de agua se realiza por las raíces y en cantidad muy superior a las necesidades reales y al contenido de agua de la planta en un momento dado. Ello se debe al fenómeno de la transpiración, que es uno de los procesos básicos de la planta. Mediante este proceso la mayor parte del agua absorbida es transportada a través de las raíces y los tallos hasta las hojas en las que se produce su evaporación, a través de los estomas, principalmente.

La regulación de la transpiración por la planta se ejerce mediante el control de apertura y cierre de los estomas. Este mecanismo se halla influido por la tensión de vapor de agua y el contenido de gas carbónico  $\text{CO}_2$  en el aire. Cuando el flujo del agua disminuye por cualquier causa se cierran los estomas, reduciendo de este modo la pérdida de agua. Una baja concentración de  $\text{CO}_2$  en la hoja, que ocurre al iniciarse la fotosíntesis cuando se ilumina la hoja, provoca la apertura de los estomas para permitir la entrada de este producto.

Hay que destacar la necesidad que tiene la planta de absorber agua del suelo de forma continua para mantener un crecimiento normal, si la planta no transpira, no crece. La falta de absorción durante un solo día puede tener graves consecuencias para el desarrollo futuro.

De ahí la importancia de este factor que se hace crítico en algunas etapas más delicadas del desarrollo, como la floración y el cuajado de los frutos, en los que una escasez aún ligera de este elemento puede afectar de modo irreversible a la producción.

La absorción del agua del suelo por la planta es posible siempre que el potencial de succión de agua de la planta sea superior a aquel del suelo, siendo en general la velocidad de absorción proporcional al diferencial entre ambos potenciales, es decir, a través del fenómeno osmótico.

La planta llega a absorber cantidades de agua que varían entre los 300 y los 800 litros por cada Kg de materia seca que produce. La diferencia de estas cantidades depende, tanto de la especie en cuestión como de las condiciones climáticas. La así llamada “eficiencia de utilización del agua” por la planta depende de muchos factores, con los que existen interacciones muy estrechas, y entre ellos, figuran los elementos nutritivos.

Se llega de este modo a una situación deficitaria de agua en la planta que pierde la turgencia de las células y se marchita. Esta situación es reversible si existe agua disponible, en cuanto la célula no haya muerto, ya que en este caso dejan de funcionar las membranas semipermeables de la misma y no se produce la imbibición o hinchamiento de la célula.

La planta reajusta continuamente la tensión de succión, o la medida equivalente que es el potencial del agua en la planta, para mantener un diferencial suficiente con la del suelo, siempre que esta no llegue al punto de marchitez (Domínguez, 1986).

## 1.2 RELACION AGUA-PLANTA

### 1.2.1 Procesos básicos

La vida está íntimamente ligada con el agua y en particular en su fase líquida. El agua es la forma en que el átomo de H, un elemento esencial para todas las moléculas orgánicas, es absorbido y entonces acumulado en el curso de la fotosíntesis. El  $\text{H}_2\text{O}$  puede ser considerada como un nutriente en la misma manera que el  $\text{CO}_2$  y los  $\text{NO}_3^-$  son nutrientes también. La cantidad de agua requerida para la fotosíntesis es sin embargo pequeña con respecto al balance

total de uso de agua por la planta. (<0.01%). La mayoría de las funciones en las que el agua está involucrada son de naturaleza física. El agua es el solvente de muchas sustancias, iones inorgánicos, azúcares y aniones orgánicos. También representa el medio en el que muchas reacciones bioquímicas ocurren. El agua hidrata partículas alterando su comportamiento físico y químico. En su forma líquida permite la difusión y el flujo básico que transportan iones hacia la planta, siendo también esencial para la translocación y distribución nutricional. El agua también ejerce presión de turgencia en el citoplasma y en la pared celular, manteniendo la rigidez de las raíces, hojas y otros órganos de la planta (Aguirre, 2006).

### 1.2.2 Potencial hídrico

El término potencial hídrico describe el estatus de energía del agua. Puede ser definida como la diferencia en potencial químico por unidad de volumen entre el agua pura y una muestra de agua a la misma temperatura. Esto se expresa por la ecuación:

$$\Phi = \frac{\mu_w - \mu_w^0}{V_w}$$

Donde  $\Phi$  es el potencial hídrico,  $\mu_w$  el potencial químico de una muestra de agua,  $\mu_w^0$  es el potencial químico del agua pura y  $V_w$  es el volumen de agua en el sistema. La variable  $\phi$  se expresa en  $N/m^2$  o mejor, expresado en Pascales (Pa). Puesto que las unidades de Pa son muy pequeñas, generalmente se usa la unidad "bar" ( $1\text{bar} = 10^5\text{Pa}$ ). El potencial del agua pura es por definición igual a cero.

El agua puede estar sujeta a presiones hidrostáticas o de succión. La primera es positiva y la segunda es negativa. El potencial del agua es también modificado por los solutos disueltos en la solución. Los solutos diluyen la concentración del agua, disminuyendo su potencial hídrico.

$$\Phi = \Phi_p + \Phi_s + \Phi_m \quad 1$$

Donde  $\phi_p$  es el potencial de presión que es numéricamente igual a la presión hidrostática, tiene signo positivo. El valor  $\phi_s$  es el potencial resultante de la presencia de solutos y es llamado potencial osmótico. Este potencial es siempre de signo negativo. El símbolo  $\phi_m$  es el potencial mátrico que representa la succión, efecto de las superficies sólidas en la fase acuosa. El agua puede enlazarse con gigantescas moléculas de proteínas, por medio de enlaces de puente de H.

Además de este efecto adsorbente, el agua es mantenida en tubos capilares debido a los efectos de la tensión superficial. Estas fuerzas son llamadas mátricas ya que restringen la movilidad del agua. El signo de este potencial es por lo tanto negativo. Así el movimiento del agua en las células, tejidos y la planta entera toma lugar siempre de mayor a menor potencial (Aguirre, 2006).

### 1.2.3 Osmosis

La osmosis ocurre cuando dos soluciones de diferentes potenciales hídricos se encuentran separadas por membranas semipermeables, que permiten la penetración de las moléculas de agua pero no la de solutos disueltos en agua. Ver Fig.1

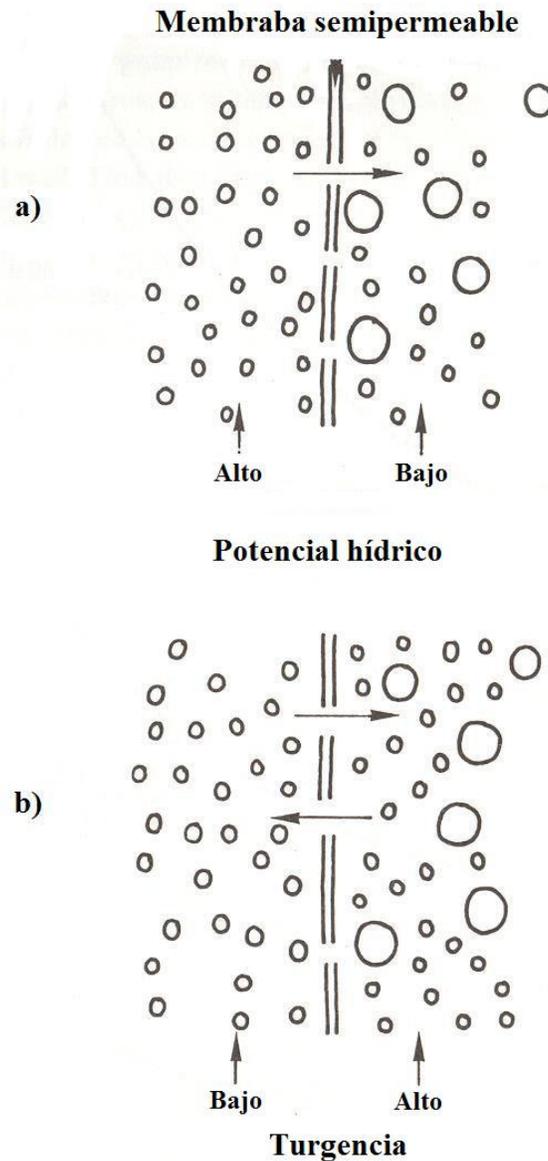


Figura.1 Entrada del agua a la célula

La célula de la planta puede ser considerada como un sistema osmótico. Si una célula es expuesta a agua pura habrá una absorción neta de agua por la célula. Esto resulta debido a la presencia de solutos que hacen que el potencial químico del agua dentro de la célula sea menor que el del agua pura.

Cuando el potencial hídrico del medio ambiente es menor que el de la célula (soluciones hipertónicas) el movimiento neto del agua procede desde la célula al exterior. Esta pérdida de agua resulta inicialmente en un encogimiento del volumen de la célula, que en estado avanzado es seguido por una contracción del citoplasma y por la separación de la pared celular. Este fenómeno es llamado plasmólisis. Si la célula no ha sido dañada, este proceso es reversible. La concentración de solutos dentro de la célula son del orden de 0.2-0.8 M. Concentraciones mayores del medio externo pueden causar plasmólisis (Aguirre, 2006).

#### 1.2.4 Adsorción e imbibición

Una pequeña fracción de agua en las plantas es adsorbida por las superficies de las paredes celulares, organelos de la célula, moléculas e iones. Las plantas secas también tienden a adsorber agua de sus alrededores. Este proceso es de importancia biológica, por ejemplo; las semillas embebidas en el suelo, rápidamente adsorben agua de sus alrededores. Las moléculas de agua penetran en los espacios intercelulares por medio de las fuerzas de adsorción, causando así la hinchazón de la semilla. Este proceso de absorción de agua provee a la semilla de agua suficiente para los procesos bioquímicos que inician el proceso de germinación. La absorción de agua causada por las fuerzas de adsorción es llamada imbibición.

#### 1.2.5 El balance del agua

El potencial hídrico de la atmósfera es generalmente menor que el del suelo. Esta diferencia de potencial hídrico es el mecanismo por medio del cual el agua es traslocada del suelo a la planta y luego a la atmósfera. Existe así una gran diferencia de potencial hídrico entre las hojas verdes, los estomas y la atmósfera. En su paso del suelo al tallo y a las hojas, las moléculas de agua se enfrentan a diversos obstáculos (Aguirre, 2006).

Se distinguen tres principales pasos en la translocación del agua; el transporte centrípeto de la solución del suelo, vía la corteza de los tejidos de las raíces hacia los vasos del xilema del cilindro central, el transporte vertical desde las raíces hacia las hojas y finalmente la liberación del agua en forma gaseosa a la interfase de la planta con la atmósfera. Figura. 2

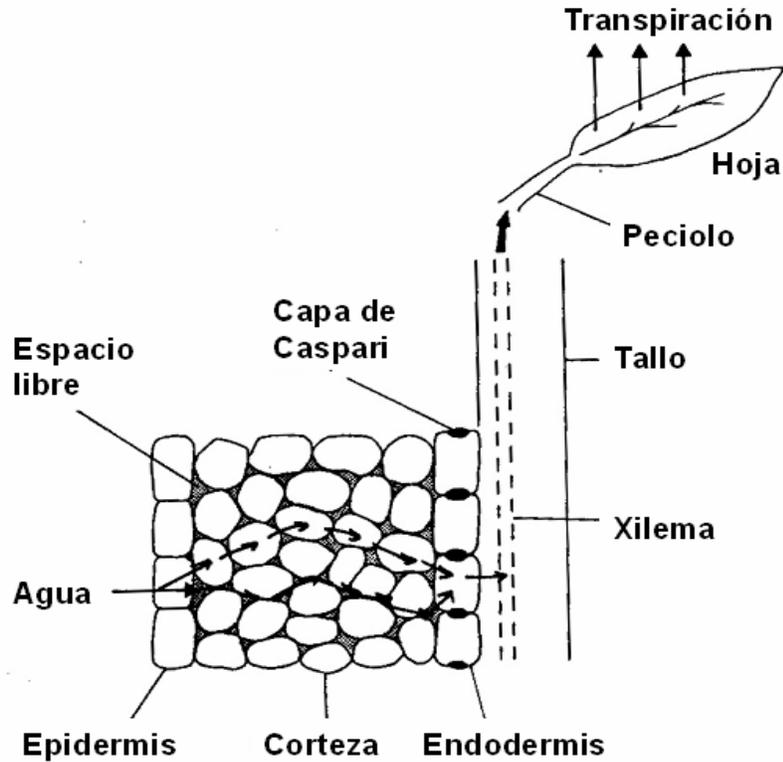


Figura. 2 Mecanismo por medio del cual el agua es traslocada del suelo a la planta y luego a la atmósfera.

### 1.2.6 Absorción de agua por las raíces

Los tejidos de una raíz joven incluyen el tejido cortical, la endodermis y el cilindro central vascular del xilema y el floema. La endodermis separa a la corteza del cilindro central (estele) caracterizado por una capa suberizada. Ver Fig. 3

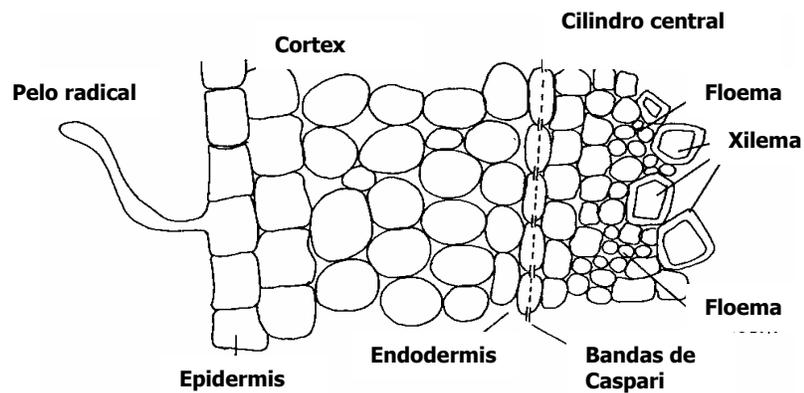


Figura. 3 Absorción de agua por las raíces.

Esta capa se presenta en las paredes celulares en forma radial y transversa, y es conocida como el cinturón, banda o capa de Caspari. Esta faja está hecha de lípidos y ligninas, presentando una alta resistencia al transporte de solutos y de agua. La fracción de membrana celular llamada apoplasto (lejos del plasma) comprende todas las partes del tejido abierto a los solutos y al agua, no habiendo entonces que atravesar ninguna membrana. Los poros y los espacios intercelulares del apoplasto son conocidos también como espacio libre o espacio libre aparente. Así, el citoplasma de una célula está conectado con el citoplasma de otras células vecinas por medio de numerosos plasmodesmatos. Este continuo es llamado simplasma.

El apoplasto de la raíz cortical, a través de sus numerosos pelos radiculares, está en contacto directo con el suelo, resultando así en la absorción de agua por capilaridad y ósmosis. El agua puede ser entonces absorbida desde los espacios libres, y desde el plasmalema, una membrana biológica semipermeable que permite el movimiento osmótico del agua.

Las bajas temperaturas, la falta de oxígeno y las sustancias tóxicas reducen la absorción de agua debido al nocivo efecto en el metabolismo (Aguirre, 2006).

El flujo de agua desde el suelo hacia el cilindro central de la planta es conocido como transporte centrípeto del agua (ver Figura 4). Una raíz joven de una planta no muestra todavía desarrollada la capa suberizada de la endodermis (no hay capa de Caspari). Esta ausencia permite el movimiento de agua desde la solución del suelo a los tejidos vasculares, ya sea en el apoplasto o en el simplasto. En las células que ya han desarrollado su capa suberizada, el flujo de agua a través de la endodermis y hacia el cilindro central, tiene que seguir principalmente el camino simplasmático mostrado en la figura 4

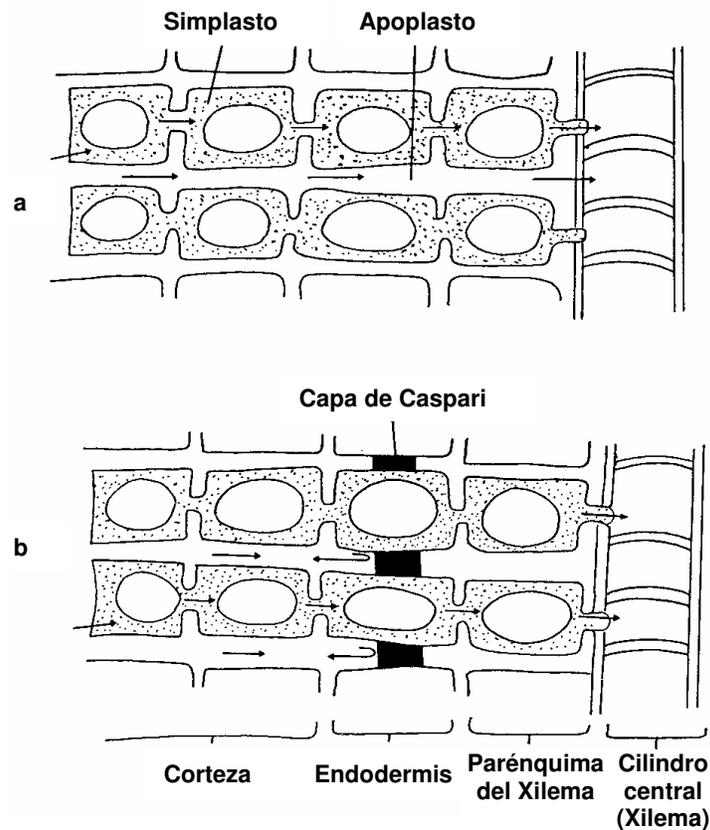


Figura.4 movimiento del agua desde la solución del suelo a los tejidos vasculares

### 1.2.7 Estrés hídrico

El estrés hídrico en las plantas es uno de los factores limitantes de la producción de cultivos. Esta puede conducir a una reducción en la presión hidrostática  $\phi_p$  dentro de las células y resultar en el incremento de sustancias macromoleculares y solutos de bajo peso molecular. Además de presentar una reducción en la actividad del potencial químico del agua en la planta, afectando los procesos metabólicos (Aguirre, 2006).

### 1.2.8 Desarrollo del estrés hídrico

Un esquema tentativo del desarrollo de este efecto en los tejidos se muestra enseguida. El primer cambio sugerido es la reducción en el crecimiento en los ápices de crecimiento y en las hojas, problema acarreado por la reducción del potencial del agua. Seguido por la disminución en la síntesis de proteína y de pared celular en los tejidos con alto potencial de crecimiento. Si el estrés continúa, la división celular decrece y los niveles de algunas Enzimas también. Los estomas pueden cerrarse con la debida consecuencia de una reducción en la transpiración y absorción de  $\text{CO}_2$ . La acumulación de azúcares y prolina se presentan y la absorción del  $\text{CO}_2$  cae a un nivel muy bajo. Este fenómeno es acompañado por los cambios anatómicos, que

incluyen la cavitación del xilema, el bloqueo de los espacios de vapor, la senescencia de las hojas, y finalmente, la muerte de la planta.

### 1.2.9 Salinidad

En general la presencia de iones solubles en el medio nutritivo puede afectar el crecimiento de dos maneras; a) incremento de las concentraciones de iones específicos que pueden ser tóxicos e inducir desordenes fisiológicos ( $\text{Na}^+$  y B). Las sales solubles decrecen el potencial hídrico del medio nutritivo, restringiendo la absorción de agua por la planta. Este efecto puede ser contrarrestado ya que a mayor contenido de sales, mayor es la absorción de iones. Esto decrece el potencial hídrico de la planta en las raíces y estimula la absorción de agua que se manifiesta en turgencia de los tejidos. Este medio de mantener un balance positivo de agua es conocido como ajuste osmótico.

La salinidad puede afectar diferentes procesos metabólicos como; absorción de  $\text{CO}_2$ , síntesis de proteínas, respiración, y transformación de fitohormonas. Afortunadamente existen plantas tolerantes a las sales. (Aguirre, 2006).

## 1.3 MANEJO DEL AGUA EN EL SUELO

Las plantas necesitan agua de forma continua, mientras que las lluvias se producen de manera intermitente. Esto supone un desajuste temporal entre las necesidades y aporte de agua. El suelo compensa este desfase, pues actúa como el depósito que permite un suministro constante a las plantas.

Sin embargo, unos suelos tendrán mejores características para funcionar como depósito de agua que otros. Para medir de forma útil la capacidad que tiene un suelo de actuar como almacén de agua se definen en los conceptos siguientes:

- Capacidad de campo: máximo contenido de agua que puede retener un suelo en condiciones de libre drenaje, es decir, en suelos no saturados (Martínez, 1999). Depende de la textura, la estructura y de factores como la disposición de los horizontes en el perfil del suelo.
- Punto de marchitamiento. Contenido de agua en el suelo a partir del cual las plantas se marchitan de forma irreversible. Depende de la textura, la estructura, la salinidad, la potencia del sistema radicular, entre otros.

Dado que el contenido de agua se expresa como un porcentaje de altura, el agua contenida en un suelo o el agua en una precipitación se puede expresar también en milímetros. Es decir, cuando se habla de que la lluvia caída es de tantos milímetros significa que de no haber infiltrado sobre el terreno habría una columna de agua de esos milímetros (Martínez, 1999).

Cuando se habla de agua contenida o precipitación caída sobre un área de dimensiones determinadas se refiere a volúmenes en litros por metro cuadrado o a metros cúbicos por hectárea, lo que es equivalente a expresar la cantidad de agua en milímetros. Con los conceptos de capacidad de campo y punto de marchitamiento, se define un nuevo término que es el “agua útil” ó dosis máxima.

Desde el punto de vista de las plantas, es necesario conocer no sólo el contenido de agua en un suelo, sino también la energía con la que el agua es retenida. Dependiendo del tipo de suelo las plantas necesitaran realizar más o menos trabajo para absorber el agua del mismo a través de las raíces, sobre todo cuando las condiciones están próximas al punto de marchitamiento. Por ello es necesario definir un nuevo concepto que cuantifique la retención de agua por el suelo, éste es el potencial hídrico (Martínez, 1999).

### 1.3.1 Balance hídrico

Bajo condiciones ideales, la cantidad de agua en la zona de absorción de la planta será igual a la cantidad de agua requerida por la misma durante su crecimiento. En la mayoría de los casos no es así y se necesita controlar el agua. El control de agua se basa en los movimientos de agua en la zona de absorción de la planta.

1. Precipitación. Representa una cierta cantidad de agua en un cierto momento.
2. Infiltración en la parte superior del suelo.
3. Escurrimiento. La cantidad de agua de lluvia que no puede infiltrarse, se pierde por escurrimiento.
4. Infiltración hacia el subsuelo.
5. Parte del agua infiltrante en el subsuelo puede subir nuevamente por movimiento capilar y volver a la zona de absorción.
6. Parte del agua infiltrada en el subsuelo no es recuperable.
7. Cantidad de agua almacenada en la zona de absorción.
8. Cantidad total de agua en la zona de absorción.
9. Cantidad de agua que se pierde por evaporación.
10. Cantidad de agua requerida por la planta.
11. Transpiración de la planta.
12. Cantidad de agua en la zona de absorción está en equilibrio con la cantidad de agua de evaporación y de absorción.

13. La infiltración en la zona de absorción es mayor. No ocurre escurrimiento, pero la cantidad de agua en la zona de absorción es mayor que la demanda.
14. El exceso de agua se debe de eliminar por medio de drenaje.
15. La infiltración de agua en el subsuelo es mayor.
16. La cantidad de agua en la zona de absorción no cubre la demanda.
17. Lo que falta, se debe suministrar mediante un sistema de riego.

El control entre la cantidad de agua disponible en la zona de absorción, y la demanda de agua en esta zona, depende entonces de los siguientes factores:

- 1) Precipitación. Es un factor que difícilmente se controla.
- 2) Infiltración en la capa superior del suelo y escurrimiento. Son factores que, hasta cierto punto, se pueden controlar por medio de labranza y por un aumento del contenido de materia orgánica en el suelo.
- 3) Infiltración hacia el subsuelo y movimiento capilar del agua. Estos factores dependen, en principio, del tipo de suelo.
- 4) Almacenamiento de agua en la zona de absorción. Es un factor parcialmente controlable por medio de un mayor contenido de materia orgánica y por la labranza.
- 5) Evaporación. Se pueden tomar varias medidas para controlar este factor, por ejemplo, mediante una cobertura del suelo.

En el caso que el control de estos factores mismos no alcance para balancear la cantidad de agua disponible y la humedad, se debe llevar a cabo un control final por medio de sistemas de riego y drenaje (Manual, 1999).

### 1.3.2 Factores que afectan la retención de agua en el suelo

La cantidad de agua almacenada en un suelo y la mayor o menor facilidad para que pueda absorberse por las raíces de las plantas, depende fundamentalmente de las características del suelo. Estas características o factores del suelo que afectan a la capacidad de almacenamiento y al potencial hídrico, que por consiguiente determinan la retención de agua, son:

1. La textura y porosidad: La textura la determina la proporción de los diversos tamaños de partículas que tiene un suelo mientras que la porosidad es la proporción de poros con respecto a las partículas del suelo. En el suelo el agua se retiene en

forma de película sobre la superficie de las partículas y en los poros; por tanto como los suelos de textura fina tienen mayor superficie total y mayor volumen de pequeños poros, tienen mayor retención que los suelos de textura más gruesa.

2. La estructura, es la forma geométrica en que se unen y relacionan entre sí las partículas que tiene un suelo en función de sus diferentes tamaños. La relación entre macroporos y microporos influye en que un suelo esté mejor o peor estructurado. Un volumen elevado de microporos, que retienen fuertemente el agua, supone una excesiva inmovilización de la misma con mayor trabajo para las raíces de las plantas y falta de aireación; mientras que un volumen elevado de macroporos, que permiten el paso del aire, supone poca cantidad de agua en el suelo por excesivo drenaje. Hay otros elementos como los factores floculantes de los coloides del suelo o los factores dispersantes que modifican la estabilidad estructural, mejorándola los primeros y reduciéndola los segundos.
3. El contenido en materia orgánica, pues es un componente que presenta una gran capacidad de retención de agua.
4. El tipo de arcilla. Dependiendo del tipo de arcilla se retiene más o menos agua en un suelo y con mayor o menor intensidad. Las características de las mismas que afectan a la retención de agua en el suelo son: la capacidad de expansión de un determinado tipo de arcilla, la absorción interna de agua por parte de la arcilla y la capacidad que tienen las arcillas para modificar la estructura de un suelo (Martínez, 1999).

### 1.3.3 Retención de agua en el suelo

Los agricultores intentan garantizar el abastecimiento de toda el agua necesaria para las plantas. Los agricultores tienen que producir cultivos que se puedan adaptar al área en el que se encuentran. Cada planta cultivada necesita un espacio individual lo suficientemente amplio como para permitir que las raíces se expandan y acumulen suficiente humedad, para ello se realizan técnicas que permitan mejorar las condiciones de los vegetales en campo.

Algunas de las labores son las de remover el suelo para que las raíces de las plantas puedan crecer en dirección descendente hasta alcanzar la humedad; además, los agricultores evitan el arado profundo durante el verano, pues esta práctica daña las raíces y permite que la humedad se escape y en ocasiones los campos se dejan en barbecho (campo arado pero no sembrado) durante un año, para permitir que las capas inferiores del suelo se humedezcan lo suficiente (UACH, 1991).

Otra técnica poco usada pero efectiva en la conservación de la humedad, es el uso del "pileteo" que se usa para la captación del agua de lluvia, reduce los riesgos de sequía en los cultivos al aumentar el agua disponible para las plantas; además es una práctica de conservación de suelos al reducir los riesgos de erosión causados por el escurrimiento superficial y propiciar el desarrollo de la cubierta vegetal, la cual protege al suelo del impacto de las gotas de lluvia. Este sistema se utiliza en cultivos en hilera y consiste en

levantar pequeños bordos de tierra a distancias regulares a lo largo del surco, con un implemento denominado pileteadora.

El pileteo se aplica simultáneamente con las labores de escarda y mientras sea más oportuno, hay más posibilidades de captar los eventos de lluvia intensos. Si las piletas están bien conformadas se pueden retener hasta 50 milímetros de lluvia (UACH, 1991).

Otras labores agrícolas también coadyuvan a incrementar la eficiencia de uso del agua, como el control de las malas hierbas que reduce la pérdida de humedad causadas por estas plantas, así mismo, este tipo de control se puede realizar mediante la incorporación de aporque y acolchados de plástico u orgánicos (Manual, 1982).

También el uso de acolchados de polietileno trae beneficios en la retención de humedad, y en el control de malezas, humedad del suelo, temperatura, estructura física del suelo, mejor dosificación de la fertilización y optimización de la actividad microbiana. El acolchado del suelo con polietileno negro ayuda a eliminar casi la totalidad de la maleza, excepto algunas como el coquillo. Este efecto del plástico negro se debe a la impenetrabilidad de la luz, que impide la actividad fisiológica de la maleza.

El uso de plástico transparente permite que las malezas se desarrollen, según la especie, con más o menos exuberancia. La aplicación correcta de plástico transparente permite que la temperatura y la humedad alta bajo el mismo quemen las malezas germinadas en las primeras fases del desarrollo germinativo.

La acción del acolchado en la humedad del suelo se logra solamente si éste es lo suficientemente amplio en torno a la planta. Cualquier pérdida de agua es por percolación, ya que el acolchado impide la evaporación casi totalmente. El efecto del acolchado sobre la temperatura del suelo está fuertemente influenciado por el tipo de plástico que se utilice (ya sea por la composición química o por la coloración del mismo). El plástico transparente permite el paso de la radiación luminosa y aumenta la temperatura del suelo, lo que favorece el desarrollo de la maleza. El plástico negro absorbe la mayor parte de la radiación, impidiendo el desarrollo de la maleza, pero obstaculiza hasta cierto grado el calentamiento del suelo. El PVC obstaculiza más que el polietileno la salida de la radiación (Robledo, 1981).

#### 1.3.4 Plásticos en la agricultura

Las estadísticas nacionales presentan una elevada tendencia al uso de plásticos en la agricultura debido a su gran eficiencia y su elevada optimización. Principalmente se observa un desarrollo en la agricultura con plásticos en los cultivos de tomate, chile, calabacita, pepino y fresa (Robledo, 1981).

Los agricultores que hacen uso de plásticos para la explotación de recursos en el campo, lo relacionan mediante las siguientes técnicas:

1. Acolchado ó arropado de suelo

2. Cubierta flotante
3. Microtúnel
4. Macrotúnel
5. Invernaderos ó abrigos
6. Riego localizado
7. Mallas
8. Esterilización de suelos
9. Embalses artificiales
10. Ensilado de forrajes
11. Envase y embalaje
12. Hilos y tejidos de rafia

De una manera especial, pero muy poco usual y conocida, es la técnica de modificación estructural del suelo. En México el 70% de la agricultura se desarrolla en suelos erosionados con altos contenidos de sales, con poca capacidad de retención de humedad como los arenosos, compactos tal como los arcillosos, y de bajo drenaje. Pudiéndose mejorar considerablemente con la aplicación de espumas de urea-formol ó de poliestireno poliéster; también, pueden emplearse mantas o redes de plástico fabricadas basándose en fibras y filamentos de polipropileno, poliéster y poliamidas (polímeros).

Una de las ventajas, sin duda más importante en la utilización de los plásticos en la agricultura, es el incremento de la producción de cosechas fuera de estación, que hace unos años era bastante difícil y hay que reconocer que el empleo de estos materiales ha venido a ser una importante ayuda en el cotidiano laborar del hombre para conseguir más alimentos y un más elevado nivel de vida, y esto además, con una notable reducción de gastos (Manual, 1982).

### 1.3.5 Conservación y captación de humedad en el suelo

En ocasiones, la única manera de producir cultivos normales es mediante la incorporación artificial de agua, es decir, mediante la instalación de sistemas de riego. Las necesidades del riego dependen del desequilibrio que existe entre el agua disponible y el agua que la planta consume. Esto sucede cuando la disponibilidad del agua es menor que los requerimientos de la planta.

El desequilibrio entre la disponibilidad y las necesidades de la planta puede ser en otro sentido, es decir, la planta consume menos agua de la que está disponible en el suelo. En este caso, el agua se controla por medio del establecimiento de sistemas de drenaje.

Existen diferentes formas para distribuir el agua en el terreno. De acuerdo con el tipo de distribución los sistemas de riego se pueden clasificar como sigue:

- Sistema de riego por gravedad.
- Sistema de riego por aspersión.
- Sistema de riego por goteo.

En los sistemas de riego por gravedad se aprovecha la energía potencial del agua para su conducción y colocación en los terrenos de cultivo que se pueden regar por inundación, por surcos, por melgas (que son corrugaciones del terreno).

El riego por aspersión consiste en la distribución del agua en forma de lluvia. Esto se hace mediante un equipo de riego y por la presión hidráulica de una bomba. El equipo consta de bomba, tuberías y aspersores. La distribución no depende de la gravedad, y no requiere la nivelación del terreno. Los sistemas de riego por microaspersión y nebulización también conocidos como de riego localizado, son variantes del sistema de riego por aspersión

El riego por goteo consiste en la aplicación local del agua al sistema radicular de la planta y del árbol. Mediante este sistema, se suministra el agua a la planta y al árbol individualmente. De esta manera, el agua cae en los lugares donde es necesaria (Manual, 1999).

Otra de las prácticas es la de adiciones de materia orgánica sobre el área de almacenamiento y siembra en donde éstas se efectúan con el fin de mejorar la estructura del suelo, aumentar la capacidad de retención de humedad y en consecuencia la cantidad de agua almacenada. Algunos productos que se pueden adicionar son: abonos verdes, estiércoles, residuos de cosechas, compostas, etc.

Todos estos sistemas ayudan a los agricultores a mantener un abastecimiento continuo de agua para las plantas (UACH, 1991).

La demanda de alimentos y fibras crece al mismo tiempo que la población, y los expertos en riego serán consultados para resolver los problemas que plantea la mencionada demanda. Más tierras de los desiertos y zonas áridas deben ser regadas, pues el agua elevará enormemente su productividad. De la misma forma, el rendimiento de los terrenos de secano puede aumentar cuando sean transformados. Hay que tener en cuenta la inversión necesaria para la puesta en riego de nuevos terrenos será muy superior a la realizada para la implantación de los actuales regadíos. Los mayores pantanos, los canales más largos, los túneles y sifones invertidos más costosos, todavía no han sido construidos. En la medida en que la población crece, la demanda de agua para el riego se incrementará. De ahí que se estén creando fuentes de almacenamiento y abastecimiento para cubrir las necesidades de agua, como son:

### 1.3.6 Almacenamiento de agua

Presas permeables ó de gaviones:

Son una técnica de cultivo de inundación, donde las aguas de escurrimientos superficiales son esparcidas en los fondos de valles para mejorar la producción de cultivos. Al mismo tiempo, se controla el desarrollo de las cárcavas; las estructuras son típicamente largas, con paredes de baja altura al revés de los valles. Las presas permeables de roca pueden ser

consideradas como una forma de “terrazas wadi”, aunque esta última se utiliza normalmente para estructuras dentro de corrientes de agua en zonas más áridas.

Presas de tierra de pequeñas dimensiones ó bordos de tierra:

Las presas de tierra ( la tierra sigue siendo un material de construcción de primer orden), pueden ser de grandes dimensiones ó de pequeñas dimensiones. A las presas de pequeñas dimensiones también se les llaman “bordos” ó “bordos de tierra”; estas presas son casi siempre de sección homogénea. Las presas de tierra de grandes dimensiones generalmente son de “materiales graduados” y “corazón impermeable”.

Microcaptación tipo “Negarim”

La microcaptación tipo Negarim es en forma de diamante, cuya base está rodeada por bordos pequeños de tierra, con un hoyo de infiltración en la esquina más baja de cada uno, el escurrimiento superficial se colecta desde el interior de la base y se almacena en el hoyo de infiltración. La microcaptación es utilizada para árboles o arbustos, esta técnica es apropiada para plantaciones de árboles en pequeña escala en cualquier área que tenga deficiencia de humedad. Además, la captación de agua de lluvia para los árboles, conserva simultáneamente el suelo. La microcaptación tipo Negarim es precisa y relativamente fácil de construir.

Bordos al contorno

Los bordos al contorno para árboles son una forma simplificada de microcaptaciones. La construcción puede ser mecanizada y la técnica es por tanto apropiada para la instrumentación en una mayor escala, como su nombre lo indica, el bordo sigue el contorno en espacios cerrados y con la formación de pequeñas represas de tierra, el sistema queda dividido en microcaptaciones individuales. Con o sin mecanización, este sistema es más económico que la microcaptación tipo Negarim, particularmente por la instrumentación a gran escala en tierra uniforme, puesto que se moverá menor cantidad de suelo. Otra ventaja de los bordos al contorno es su adaptabilidad para la producción de cultivos o de forraje entre ellos. Al igual que con otras formas de captación de agua de lluvia, el rendimiento de escurrimiento superficial es alto y cuando se diseña correctamente, no hay pérdida de escurrimiento superficial fuera del sistema.

Bordos semicirculares

Los bordos semicirculares son terraplenes de tierra en forma de un semicírculo con las represas de los bordos sobre el contorno, los bordos semicirculares de dimensiones variables son un sistema de captación externa, utilizados principalmente para la rehabilitación de agostaderos o producción de forraje, esta técnica es también útil para el cultivo de árboles y arbustos en algunos casos han sido utilizados para la producción de cultivos dependiendo de la ubicación y relación área de captación, área de cultivo elegida, puede ser una técnica de captación para pendientes cortas o largas. Los bordos semicirculares son recomendados como un método rápido y fácil para el mejoramiento de pastizales en zonas semiáridas, los bordos semicirculares son más eficientes en función del

área de almacenamiento al volumen del bordo que otras estructuras equivalentes como los bordos trapezoidales.

#### Bordos al contorno (microcuencas)

Esta es de nuevo una técnica de microcaptación, los surcos siguen el contorno a un espaciamiento de 1 a 2 metros. El escurrimiento superficial es captado de la faja no cultivada entre los bordos y almacenado en un surco justamente sobre el bordo. Los cultivos se colocan en ambos lados del surco, el sistema es simple y puede construirse a mano o con maquinaria, puede representar aún menos trabajo intensivo que la labranza convencional de una parcela.

La producción de escurrimiento superficial de las longitudes de área de captación cortas es extremadamente eficiente y cuando se diseñan y construyen correctamente no existen pérdidas de escurrimiento superficial fuera del sistema. Otra ventaja es el crecimiento uniforme de cultivos, debido a que cada planta tiene aproximadamente la misma área de captación.

#### Bordos de piedra al contorno

Los bordos de piedra al contorno son utilizados para reducir el escurrimiento superficial, favorecer la infiltración y capturar sedimentos. La captación de agua y sedimento conlleva directamente a un mejor desarrollo del cultivo, esta técnica es apropiada para la aplicación en pequeña escala en campos agrícolas, ya que con un abasto adecuado de piedra, puede ser instrumentado rápidamente y bajo costo, considerado como un sistema de captación externo.

El mejoramiento de la construcción y alineación a lo largo del contorno hace la técnica más efectiva, la gran ventaja de estos sistemas, basados en piedra, es que no hay necesidad de vertederos en donde se encuentran flujos potencialmente perjudiciales (Villareal, 2003).

Reciclamiento; Las aguas salinas constituyen otra fuente de agua para el riego. Hasta hace unos años la recuperación de este tipo de aguas se llevaba a cabo mediante el proceso natural de evaporación y su posterior condensación en forma de precipitación. Se conocen las propiedades físicas y químicas de las sales en el agua y en ellas se basan las técnicas empleadas para la puesta en práctica de métodos adecuados para depurar las aguas salinas. El agua no debe ser pura para todas sus aplicaciones. Cuando se aplican las técnicas de riego adecuadas se puede utilizar de un modo permanente agua que contenga un elevado grado de salinidad (Orson, 1979).

Pueden emplearse también polímeros granulados con alta retención de agua en el suelo, haciendo un uso más óptimo del recurso agua, evitando que ésta se evapore y pueda ser aprovechada por las plantas. Éstos polímeros reciben el nombre de súper absorbentes ó acondicionadores del suelo.

En la actualidad existen ya una gran diversidad de polímeros, con diversas propiedades y características, y de diversos plásticos o fuentes de origen. Con ya ciertas especificidades

de aplicación, tanto en cultivos, como para otros usos. Pero la principal razón por la que han entrado al mercado agrícola, es por la absorción de agua y liberación lenta de la misma (Robledo, 1981).

## 1.4 LAS POLIACRILAMIDAS EN LA AGRICULTURA

### 1.4.1 Principios básicos de uso

Los plásticos acondicionadores de suelos son formados de polímeros; estos polímeros son subproductos derivados del petróleo, y son utilizados más comúnmente como resinas, en pinturas automotrices, barnices, ductos, en estabilización de caminos de tierra rurales, etc.

Los polímeros son la unión de más de dos monómeros; algunos monómeros son solubles en agua y por lo tanto sus polímeros también, pero cuando estos se retículan (se forma una red de polímeros) cambian drásticamente sus propiedades físicas y químicas, y casi siempre este cambio es favorable para las diversas aplicaciones que tienen en la industria, medicina y agricultura.

Los polímeros hidrosolubles, al ser reticulados forman hidrogeles de importancia en la medicina como biomembranas, y en la agricultura como absorbentes y retenedores de agua principalmente. Una vez reticulados estos polímeros ya no son solubles en agua, pero absorben agua por hinchamiento con lo cual la evaporación de ésta es lenta, ya que con esto el proceso de absorción y de evaporación se puede repetir infinidad de veces. La formación de un hidrogel depende de varios factores: el peso molecular del polímero inicial, el método de formación del hidrogel, el estado físico del polímero, la humedad que contiene el polímero y la presión a la que se somete éste (Canizal, 1993).

### 1.4.2 Tipos de poliacrilamida

Los acondicionadores que se usan en los suelos son formados a partir de polímeros que existen en el mercado. Estos hidrogeles y las láminas de Urea-Formol, se aplican de 1.0 a 1.5 metros de profundidad, en forma de espumas y posteriormente toman una consistencia dura, formando una lámina absorbente de agua, pero, muy costosa en su aplicación, adicionalmente al costo de Urea-Formol.

En la actualidad existen ya una gran diversidad de polímeros, con diversas propiedades y características, y diversos plásticos. Con ya ciertas especificaciones de aplicación, tanto para cultivos, como para otros usos (Canizal, 1993).

### 1.4.3 Naturaleza química de la Poliacrilamida

La Poliacrilamida está constituida por una gran cantidad de unidades de acrilamida (Azzam, 1980; Rubio et al., 1989), figura 5.

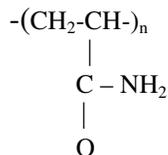


Figura. 5 Estructura química de la PAM.  
Fuente: Lara (1993).

El grado de polimerización es diverso, varía de pesos moleculares bajos como  $10^5$  a altos mayores a  $10^6$ . Las características de la Poliacrilamida están determinadas principalmente por las propiedades que le confiere el grupo funcional amida. Ver figura 6.



Figura. 6 Grupo funcional amida.  
Fuente: Lara (1993).

El grupo carbonilo,  $>\text{C}=\text{O}$  es susceptible al ataque nucleofílico en el carbono carbonílico debido a factores tanto eléctricos como estéricos, lográndose una tendencia del oxígeno a adquirir electrones, dando por resultado una elevada polaridad. Además, el radical amino del grupo amida presenta interacciones por puente de hidrógeno con otras sustancias polares, como el agua (Morrison y Boyd, 1970, citado por Lara, 1993).

El polímero gelificado presenta una estructura superior debido a los puentes de hidrógeno entre los grupos amino y carbonilo de las moléculas adyacentes y/o agregación de las moléculas por enlaces de hidrógeno.

La Poliacrilamida no es iónica (-), aunque se le puede impartir un carácter aniónico mediante la copolimerización con un ácido insaturado tal como el ácido acrílico o por sulfometilación; el carácter cationico (+) se desarrolla por copolimerización o vía una adecuada postreacción (Azzam, 1980).

#### 1.4.4 Propiedades físico-químicas de la Poliacrilamida (PAM)

Debido a su estructura química, la PAM presenta una alta superficie específica, en la cual existe elevada densidad de “cargas” o polos eléctricos que provienen de la Polarización de los grupos carbonilo. Estas características le confieren al material una alta actividad superficial (Legaspi y Lara, 1990).

La disposición reticular, la alta interacción por puentes de hidrógeno y otras fuerzas de van der Waals le permiten a la PAM ser una sustancia con gran afinidad por las moléculas de agua, con lo que adquiere propiedades coloidales típicas de un gel, es decir, de un sólido que contiene grandes cantidades de líquido (dispersión sólido-líquido).

Una cualidad importante de estos polímeros es la elasticidad o capacidad de hidratación reversible, la mayor parte de su agua retenida es disponible para las plantas (Lara y Legaspi, 1990).

Otras propiedades físico-químicas importantes que presenta la PAM, que se derivan de su superficie específica de su densidad de carga, y que le transfiere al suelo son:

- a) Una alta capacidad de intercambio catiónico (CIC). Legaspi y Lara (1990) determinaron valores de CIC de  $648 \text{ cmol (+) Kg}^{-1}$  de PAM seca, por el método de saturación con acetato de amonio 1N, pH 7 y KCl 1N como catión desplazante, mediante el método de percolación. Wallace y Wallace (1986) informaron que el número de cargas negativas puede ser de  $0.7 \text{ cmol (+) Kg}^{-1}$  de suelo conteniendo una cantidad de 0.1% de PAM, por lo tanto, de esta información se puede deducir que la cantidad de cargas por cada Kg de PAM pura y en base seca es del orden de  $700 \text{ cmol (+)}$ , lo cual corresponde con lo reportado por Legaspi y Lara (1990).
- b) Propiedades flocculantes (Wallace y Wallace, 1986): La PAM interacciona con las partículas minerales mediante enlaces de hidrógeno, dando lugar a agregados de partículas de suelo, previniendo la posibilidad de compactación e impidiendo una gran friabilidad (Azzam, 1980). De acuerdo con Tamhane (1978); la adsorción de polímeros cargados positivamente sobre las arcillas (-) ocurre mediante interacciones electrostáticas (coulómbicas) entre los grupos catiónicos del polímero y los sitios cargados negativamente de la superficie del mineral; por otro lado, los polímeros cargados negativamente tienden a ser repelidos de la superficie de las arcillas y ocurre poca adsorción, aunque esto también depende de la fuerza iónica. Una forma de favorecer la interacción polianión-arcilla es mediante cationes polivalentes que fungan como puentes de enlace (Wallace y Wallace, 1986).
- c) Adsorción de nutrimentos en las partículas de suelo-PAM, y por lo tanto mayor eficiencia en la absorción de los nutrientes aplicados como fertilizantes (Wallace, 1986).

De estas propiedades físico-químicas se derivan otras agronómicas muy importantes. Las principales propiedades físicas que se favorecen son la formación de agregados de

partículas de suelo-PAM y aumenta la energía con la que se unen, de lo que resultan agregados de partículas de suelo muy estables. De esta propiedad se derivan otras no menos importantes, como son la permeabilidad, la aireación y la retención de humedad (Lara, 1993).

A su vez, las propiedades físicas tienen gran importancia y aplicación en las prácticas agrícolas de manejo, conservación y rehabilitación de suelos. Desde el punto de vista químico la PAM tiene relativamente poca actividad, debido a su gran estabilidad, esta cualidad le permite ser catalogada como un agente de lenta liberación de N por ejemplo, debido a que su degradación por lo tanto, es muy lenta (Lara, 1993).

#### 1.4.5 Usos comerciales de la poliacrilamida

Los polímeros súperabsorbentes de interés comercial son generalmente sales sódicas del políacido acrílico entrecruzado, copolímeros de este ácido, y del almidón. El uso de los compuestos utilizados, así como los mecanismos de síntesis están aumentando la capacidad de absorción de agua rápidamente, lo que ha permitido la obtención de hidrogeles, llegándose a obtener polímeros con grados de hinchamiento superiores al 99% de su propio peso. El mecanismo por el que los polímeros son capaces de absorber tanto volumen de soluciones acuosas no es solamente físico, sino que depende de la naturaleza química del polímero. Las fuerzas que contribuyen al hinchamiento de los polímeros entrecruzados; son la energía libre de mezcla y la respuesta elástica del entrecruzamiento, aunque también existen polímeros que presentan en su estructura unidades ionizables. Así, cuando un polímero de estas características se introduce en un medio acuoso, las unidades iónicas se disocian y crean una densidad de carga a lo largo de las cadenas y una elevada densidad de iones en el gel. Este carácter iónico produce nuevas fuerzas que condicionan el hinchamiento (Quetzalcoatl, 2003).

La diferencia entre la concentración de iones entre el gel hinchado y la solución externa produce una presión osmótica, que solo puede reducirse a través de la dilución de carga, es decir, por el hinchamiento del gel, y por otro, la densidad de carga neta entre las cadenas genera repulsiones electrostáticas que tienden a expandir el gel, lo que contribuye al hinchamiento.

En los últimos años, debido sobre todo a las posibilidades comerciales que presentan estos compuestos, se ha desarrollado un importante trabajo de investigación sobre estos materiales, lo que ha derivado en la obtención de polímeros súper-absorbentes usados en nuevas y muy diversas aplicaciones. Así, se están fabricando productos con estos polímeros que ya forman parte de nuestra vida cotidiana, y que van desde pañales hasta productos para la agricultura, la industria alimentaria y telecomunicaciones entre otros.

Sin lugar a dudas, los productos estrella son aquellos dedicados a la higiene personal, que actualmente utilizan el 95% de las más de 500,000 toneladas de polímeros súper-absorbentes producidas al año en todo el mundo. Su principal aplicación es en pañales de un solo uso, los cuales son cada vez más finos como consecuencia de la inclusión de este tipo de polímeros, ya que la cantidad de líquido que pueden llegar a absorber es muy

superior a la que se producía en los espacios abiertos de la celulosa. Este tipo de polímeros se utiliza igualmente en compresas femeninas y pañales para incontinencias seniles (Quetzalcoatl, 2003).

Otras aplicaciones de los polímeros súper-absorbentes tienen que ver con el desarrollo de nuevas aplicaciones industriales en el campo de la ingeniería eléctrica y de telecomunicaciones, ya que se están empezando a emplear en los materiales de recubrimiento de cables eléctricos, cables telefónicos y de fibra óptica, creando una capa aislante que en caso de rotura en el cable, impide los daños que podría producir el agua, evitando así, problemas como corto-circuitos o cortes en las telecomunicaciones (www.soilmoist.com.mx, 2005).

Tampoco la industria alimentaría ha querido dejar atrás las posibilidades que presentan los polímeros súperabsorbentes. Los productos frescos perecederos como carnes y pescados presentan muchas veces problemas de transporte y empaquetado. Los cambios de temperatura en el envase pueden conducir a una condensación del agua sobre los productos, lo que repercute directamente en la calidad y en la caducidad de los mismos. Estos problemas se han remediado mediante el uso de bandejas de envasado que incluyen polímeros en su composición, los cuales son capaces de absorber hasta 40 veces su propio peso, incluso bajo presión, y retener el líquido permanentemente. Esto permite mantener la calidad de los productos durante un mayor periodo de tiempo.

Otro ejemplo de aplicación de los polímeros súper-absorbentes, es su empleo como nieve artificial en instalaciones cerradas para la práctica de esquí. La nieve se prepara hinchando el polímero con una cantidad de agua 100 veces su peso y congelándose in situ. La capa de gel congelada se trata para darle un aspecto real, similar al obtenido con la nieve en polvo.

Por último, un novedoso campo del empleo de estos materiales como “músculos artificiales” en robótica, ya que variando las condiciones de hinchamiento del polímero mediante cambios de temperatura, pH o concentración de sal del fluido de hinchamiento, se puede variar el volumen del gel, dando lugar a movimientos que simulan a los de la musculatura humana (Quetzalcoatl, 2003).

Otras aplicaciones, son en el control de derrames de líquidos tóxicos (derrame y separación de petróleo/agua) absorbe rápidamente cualquier derrame de líquidos acuosos, sustancias tóxicas, tanques de gasolina, filtros, geles para refrescar el cuerpo en accesorios como; pañuelos, cintas para la cabeza, cintas para las muñecas. Además de geles de cebo, geles de pesticidas, geles de limpieza, geles de fragancia, absorbentes de autopsia, geles decorativos, combate contra incendios entre otros (Quetzalcoatl, 2003).

#### 1.4.6 Usos en la agricultura de los polímeros

El uso de los polímeros en la agricultura data de fines de la década de los setenta, y principios de la década de los ochenta. Se emplearon originalmente para tratar la zona radical de plantas que eran transportadas de un lugar a otro y, de esta manera, establecer una especie de “almacén” temporal de agua en la zona radical.

Debido a su estructura química, al igual que otros polímeros, las poliacrilamidas tienen la capacidad de absorber grandes cantidades de agua (entre 200 y 400 veces su peso). Al absorber agua las moléculas se expanden y forman un gel que actúa como un pequeño almacén en el suelo. Esa agua puede ser extraída del gel por la succión ejercida por las raíces de las plantas, o puede perderse, pero a una tasa inferior que la corriente, hacia la atmósfera por evaporación (Watwood, 1998). Sin embargo, la cantidad de agua que puede retenerse por las pequeñas dosis que se aplican al suelo (20 a 30 Kg/ha) no son suficientes para satisfacer las necesidades de un cultivo, por lo que se supone que la interpretación inicial del efecto benéfico de las poliacrilamidas no es correcta. Una revisión de la misma dio origen a una nueva tecnología tanto de producción del producto como de aplicación agronómica (Fertilec, s/a).

Al mezclarse el polímero con el suelo se consigue, por un lado, aprovechar mejor el agua de lluvia o riego al perderse menor cantidad de esta agua por filtración, y por otro lado, también se consigue disminuir la evaporación de la misma. Estos dos factores son suficientes para mejorar la efectividad biológica y aumentar la productividad del suelo (Azzam, 1980). Además, la utilización de polímeros también produce una mejora de la estructura del suelo y la aireación del mismo. Asimismo, el uso de este tipo de polímeros permitiría, por ejemplo, la recuperación de zonas semiáridas o terrenos de cultivo abonados y poco fértiles cuando se emplea de forma extensiva.

También se han utilizado los polímeros, mezclándolos con abonos en campañas de reforestación, donde proporcionan a las plantas una reserva de agua para las primeras fases (las más críticas) de su adaptación al terreno. Otro campo de aplicación muy importante sería en jardinería y paisajismo, donde la utilización de estos polímeros en grandes superficies como campos de golf, campos deportivos, etc., permitiría una disminución en la cantidad de agua empleada en el riego o bien, un mayor espaciado de los mismos, con el consiguiente ahorro de agua y de dinero que ello supone (Fertilec, s/a).

#### 1.4.7 Importancia de la poliacrilamida

Durante los últimos 15 años los polímeros súper-absorbentes han llegado a ser un importante componente de muchos productos, y han tenido un gran auge en aquellos dedicados a la higiene personal.

La principal razón por la que han ingresado en el mercado agrícola, es por su capacidad de absorción de agua y de liberación lenta de la misma, para regular la disponibilidad de la planta, pero cuenta con otras propiedades, los polímeros proporcionan tamaño y estabilidad a agregados, bajo índice de erosión y controla la porosidad total y el tamaño individual del poro en el suelo. Sin embargo todas estas propiedades son reguladas, a su vez por cada una de los tipos y grado de aplicación del gel ó el potencial osmótico de la solución usada para hidratar el gel (Canizal, 1993).

#### 1.4.8 Ventajas y desventajas del uso de polímeros

Debido a sus propiedades, la PAM puede ser usada en la agricultura presentaron las ventajas siguientes:

- Proporciona agua de acuerdo con las necesidades de las plantas, no genera problemas de encharcamiento y hace uso más eficiente del recurso. Debido a que el polímero absorbe agua y bajos gradientes hídricos la libera. Un polímero puede absorber hasta 800 veces su peso en agua (Ibarra, 1991).
- El polímero proporciona nutrientes, reguladores hormonales ú otros productos solubles en agua, que pueda absorber ó que mediante el proceso de reticulación sea incorporado al hidrogel.
- Acondiciona la estructura del suelo. Por ser parecido a una arcilla, tiene la capacidad de formar agregados en suelos arenosos, mientras en suelos arcillosos actúa de una manera contraria, permitiendo un mayor espacio poroso.

Las desventajas que presenta es su costo, que puede variar desde 10 hasta 30 dólares el kilogramo (Canizal, 1993).

#### 1.4.9 Efectos en la retención de humedad.

A través de su estructura química, la PAM, al igual que otros polímeros, tiene la capacidad de absorber grandes cantidades de agua y expandirse para formar un gel que actúa como un pequeño almacén de humedad en el suelo. El agua puede ser extraída del gel por la succión ejercida por las raíces de las plantas o puede ser perdida lentamente a la atmósfera por evaporación (Lara, 1993).

La humedad aprovechable se incrementa con la dosis de PAM. Legaspi y Lara (1990) encontraron que con una dosis de 0.2% se duplicó esta propiedad. El agua retenida en el polímero estimula la diferenciación de raíces, el desenvolvimiento de hojas y el número de plantas con hojas desvolventes del *Agave tequiliana*.

La PAM incrementa el suministro de agua disponible para las plantas en el suelo y tiene buena regulación (propiedad buffer) de la actividad de las sales, por lo tanto es apropiada para mantener una adecuada absorción de agua en presencia de sales y fertilizantes en las aguas de riego (Watwood, 1998).

Esta cualidad es importante para prolongar la supervivencia de las plantas durante períodos de sequía, como lo reporto Watwood (1998) en plantas de agave. La plantación de esta especie es en el período más seco y cálida del año, de manera que el contacto del tallo de esta planta con el reservorio de agua de la PAM evita la interrupción de los procesos fisiológicos que estimulan el crecimiento y diferenciación de raíces, además de adelantar en por lo menos de uno a dos meses, el ciclo biológico de este vegetal perenne.

Otra especie en la que la PAM ha demostrado buenos resultados es con *Pinus halepensis*, como lo reportado por Watwood (1998) quien encontró diferencias significativas en la altura del árbol y el diámetro del tallo de los tratamientos con 1.5, 3.0 y 6.0 g de PAM por árbol respecto al testigo, pero no encontró diferencias entre aplicar la PAM seca o hidratada (Lara, 1993).

## 1.5 INVESTIGACIONES RECIENTES DE LA POLIACRILAMIDA

La mayoría de los estudios recientes en suelos arenosos con incorporación de Poliacrilamida, Azzam (1980), reportó que se denotan tres formas en las que la Poliacrilamida preserva el agua: 1) vía absorción por la matriz polimérica, 2) vía incubación de agregados estructurales y 3) vía recuperación de agua condensada, como un resultado de la cobertura de la superficie con el polímero.

Por ejemplo, en la desaparecida Unión Soviética, los investigadores informaron que la Poliacrilamida (PAM), agregada a la arena de las estepas y a suelos semidesérticos en una proporción de 0.5% de volumen del suelo mejoraba notablemente la estructura del mismo.

Las hinchadas partículas de PAM ayudan a unir el suelo en terrones o agregados estables, mejorando la retención de agua, la aireación, la resistencia a la erosión; y así, aumentando la fertilidad del suelo y el crecimiento de las plantas. De similar forma Azzam (1980), en Egipto, evaluó el comportamiento de una arena de río acondicionada con gel y un suelo arcilloso y fértil del Valle del Nilo; concluyendo que la arena de río acondicionada, tuvo una respuesta de estabilidad 4 veces mayor que la del suelo fértil (Canizal, 1993).

Otros estudios indican que la incorporación de hidrogeles en medios de baja capacidad de retención de agua, pueden retardar la pérdida de humedad disponible en plantas recién trasplantadas. Últimamente se están aplicando los hidrogeles a contenedores individuales para trasplante (peat) y también proveer de nutrientes (osmocote): Menciona Wallace (1986) que el hidrogel mantiene la estabilidad y la forma de bloque contenedor (peat), aparte de proveer agua; puede hidratarse el peat completo antes del trasplante y así trasplantarse, sin que sea inmediatamente regado después del trasplante. Esto trae como consecuencia, que la raíz no se expone al aire y no sufre estrés por cambio de sustrato; desarrollándose más rápidamente (Canizal, 1993).

En general se calcula que la germinación, la altura y la materia seca de las plantas tratadas ó con sustrato mejorado con hidrogeles, se incrementa a más de un 150 – 160% que los cultivados en suelos arcillosos. La producción en campo se incrementa por más de un 260 – 280% de una arena de río sin Poliacrilamida y por un 160 – 180% de un arcilloso fértil; y además existen una reducción en el consumo de agua y el uso eficiente de fertilizantes (Canizal, 1993).

Watwood (1998) evaluó la aplicación de PAM (0, 0.1, 0.2 y 0.5%) en suelos con el cultivo de cebada y lechuga. Las variables medidas fueron número de días al punto de marchitamiento, rendimiento de materia seca y eficiencia en el uso del agua. Encontraron,

en general, efecto positivo al nivel de aplicación de PAM para ambos cultivos; lo cual coincide con lo reportado por Azzam (1980), en el sentido de que la aplicación de PAM reduce los requerimientos de riegos e incrementa los rendimientos de los cultivos. Es evidente que la respuesta de la planta a la aplicación de PAM es más clara y favorable en la medida que las condiciones del suelo sean adversas para la retención de agua. Además es necesario que exista deficiencia de agua (Lara, 1993).

#### 1.5.1 Efecto de la PAM, en la estructura del suelo

La calidad de un suelo agrícola está determinada en gran medida por la cantidad y calidad de los agregados de las partículas de suelo, ya que de esta propiedad se derivan otras de naturaleza física, muy importante para los cultivos. La principal influencia de la PAM en el suelo es en la floculación, aglutinando mediante las uniones de distinta naturaleza a las partículas de suelo (Lara, 1993).

La PAM produce agregados y previene la compactación, impartiendo friabilidad al suelo (Azzam, 1980). En un suelo con problemas de encostramientos y por lo tanto con dificultades para la emergencia de las plántulas, se probaron distintas cantidades de PAM (0 a 90 Kg ha<sup>-1</sup>) aplicada en dos formas, polvo (disuelto en agua) y en forma granular; las variables evaluadas fueron emergencia de plántulas, resistencia al penetrómetro que mide compactación de un suelo y estabilidad de agregados. Para todas estas variables la aplicación de PAM resultó benéfica, los resultados más favorables fueron para la aplicación en solución Osorio y Chávez (1991). La explicación que dan los autores es que la solución presentó mayor superficie de contacto con las partículas de suelo, y por lo tanto la formación de agregados de las partículas fue mayor, así como su estabilidad; por el contrario; en la forma granular las ventajas que le da la PAM al suelo son menores debido a que su acción se limita a la zona de influencia del gránulo de gel (Lara, 1993).

#### 1.5.2 Influencia en la retención de humedad

Esta propiedad depende en gran medida de la formación de agregados y de las características del suelo; en suelos con baja capacidad de retención de agua ésta puede mejorarse con la aplicación de PAM, debido a sus propiedades hidrofílicas.

La PAM absorbe el agua del suelo, se hidrata y gelifica, evitando de esta manera la pérdida del recurso; esta agua puede ser extraída del gel por la succión que ejercen las raíces del cultivo (Lara, 1993).

Legaspi y Lara, (1990) encontraron que el porcentaje de humedad aprovechable en un suelo tratado con PAM fue de 6.4, 7.1, 8.8 y 12.3% cuando contenía 0, 0.05, 0.1 y 0.2% de PAM respectivamente; después de dos años, con mediciones anuales, disminuyó esta propiedad principalmente en los tratamientos con mayor contenido de PAM, esto se hizo más evidente después del primer año de la instalación del ensayo. Por otro lado, Osorio y Chávez, (1991) reportaron que el agua retenida por un suelo con 0, 0.01, 0.1 y 1.0% de PAM fue de 30.2,

30.9, 33.5 y 75.6% respectivamente, cuando el agua aplicada contenía distinta concentración de sales (Lara, 1993).

Legaspi y Lara, (1990), comentaron que la retención de agua por la PAM disminuye al incrementarse la concentración de sales en el agua de riego; pero se debe considerar que la PAM sola no presenta las mismas propiedades cuando se encuentra mezclada en el suelo (Lara, 1993).

### 1.5.3 Utilización en la rehabilitación de suelos afectados por sales

Entre las distintas técnicas existentes para la recuperación de suelos sódicos o salino-sódicos, la aplicación de PAM da resultados muy favorables, comparada con otros materiales utilizados para el mismo fin, ya que favorece la formación de agregados del suelo, incrementa el espacio poroso y mejora el drenaje, realizándose un mejor y más rápido lavado de sales. La adición simultánea de sales de calcio puede resultar en un mayor decremento de la sodicidad (Wallace y Wallace, 1986).

### 1.5.4 Aplicación de la PAM con fertilizantes

Los beneficios de la PAM para mejorar el acceso y absorción nutrimental es evidente en suelos con problemas de fertilidad, como es frecuente en suelos arenosos debido a la intensa lixiviación. Para contrarrestar esta anomalía la PAM retiene los nutrimentos en el sistema coloidal (gel) del cual la planta tiene capacidad de absorber. Otros polímeros utilizados como mejoradores también en forma de gel han mostrado de igual manera cualidades para aprovechar mejor el N de distintas fuentes de fertilizantes:  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ , Urea,  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  y  $\text{KNO}_3$  (Lara, 1993).

La dosis de PAM es muy importante para mejorar las condiciones del suelo que exige la planta para su óptimo desarrollo. Mediante un ensayo con trigo y tomate, se encontró que los niveles excesivos de PAM ocasionaron problemas de absorción nutrimental, ya que para ambos cultivos la absorción de P, K, Ca, Mg, Mn, Fe, Zn, Cu, Si y B fue menor, cuando se aplica con el 5% de PAM (exceso) que sin PAM (Wallace, 1986).

## II MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1 UBICACIÓN DEL EXPERIMENTO

El trabajo experimental se llevó a cabo en el laboratorio de Química de Suelos y Nutrición Vegetal L-301 y en un área de 20 m<sup>2</sup> del invernadero No. 4, de la carrera de Ingeniería Agrícola, de la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán. Ubicada en los paralelos 19°27' y los 19°45' de latitud norte y entre los 99°07' y 99°14' de longitud oeste; a una altura promedio de 2250mmsm; dentro del municipio de Cuautitlán Izcalli, Estado de México. A la altura del kilómetro 2.5 de la carretera Cuautitlán – Teoloyucan.

### 2.2 MATERIALES

A continuación se describen los materiales empleados y la metodología para lograr los objetivos planteados.

#### 2.2.1 Materiales

Para las pruebas de laboratorio se utilizaron suelo Salino-alcálico, suelo Vertisol, suelo Luvisol y Arena de río, este último para fines del trabajo se denominará como suelo arenoso. Para el experimento en invernadero se utilizaron tres tipos de suelo: Sustrato Arenoso, Suelo Luvisol y Suelo Vertisol. El sustrato Arenoso se colectó del Municipio de San Francisco Magú, en el Estado de México, el Vertisol de los terrenos agrícolas de la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlan Campo-4, el Luvisol de textura arcillosa, del Municipio de Chapa de Mota en el Estado de México y el salino alcalino de Celaya Guanajuato, México. Poliacrilamida catiónica grano medio base de potasio (94% de ingrediente activo y 6% de humedad).

#### 2.2.2 Planta de brócoli

Para el experimento en el invernadero para las pruebas de cinética de retención-pérdida de humedad para los sistemas suelo-PAM-planta: se utilizó la planta de brócoli como indicadora, debido principalmente a la época en la que se estableció el experimento (invierno), y al corto período de crecimiento que presenta.

#### 2.2.3 Otros materiales

- Bolsa negra de plástico de 2 kilos
- Papel filtro
- Latas de 400 g
- Balanza granataría y analítica
- Vasos de precipitado de 250 ml

- Embudos
- Probetas de 100 ml
- Matraces Erlenmeyer
- Estufa
- Vidrios de reloj
- Espátulas
- Matraces volumétricos
- Vasos de precipitado de 1 Lt

#### 2.2.4 Reactivos

- HCl (1.19 gcm<sup>-3</sup>, 37%)
- KCl
- Fertilizantes (H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> de 1.107 cm<sup>-3</sup>, 89%)
- (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>
- NH<sub>4</sub> NO<sub>3</sub>

### 2.3 MÉTODOS DE ESTUDIO

El trabajo se realizó en dos etapas; la primera se llevó a cabo en el laboratorio de Química de Suelos y Nutrición Vegetal L-301, del Campo 4, y la segunda en el invernadero No. 4 del área de Ingeniería Agrícola de la FES Cuautitlan, UNAM.

#### 2.3.1 Caracterización fisicoquímica y estudios cinéticos

##### 2.3.1.1 Capacidad de Intercambio Catiónico

Se midió la capacidad de intercambio catiónico pesando 1 g de PAM y agregando 50 ml de HCl aproximadamente 0.1N, se agito por 5 minutos y se filtró. Se tomó una alícuota con una pipeta volumétrica de 25 ml, colocándose en un matraz volumétrico Erlenmeyer en donde se llevó a cabo la valoración con NaOH 0.1N, utilizando como indicador 2 gotas de rojo clorofenol, realizándose la titulación por duplicado. Se utilizó el método reportado (Aguirre et al., 1985).

##### 2.3.1.2 Cinética de absorción-retención de agua por la PAM

Para evaluar el comportamiento de la PAM sobre la retención de humedad en diferentes medios se llevaron a cabo las siguientes pruebas:

- a) Se evaluó la capacidad máxima de absorción de agua destilada de la PAM; se pesaron 1 g de PAM por cada vaso de precipitados (10 en total), se adicionó agua en razón de 250 ml para cada uno, tomando el tiempo cada 3 minutos (en serie) se

filtró el agua restante de cada uno y se pesó junto con el vidrio de reloj. Por separado se midió el agua restante de cada vaso, para saber la cantidad absorbida por el PAM en el tiempo marcado. Posteriormente se colocó cada muestra en la estufa de secado a 105°C por un tiempo de 18 horas a 24 horas.

- b) Se evaluó el efecto de las concentraciones del HCl (0.01N, 0.1N y 1N) y de la sal KCl (0.01N, 0.1N y 1N) sobre la cinética de absorción de agua por la PAM ( con 10 repeticiones, hasta la no-variación apreciable). Para esto se pesó 1 g de PAM para cada vaso de precipitado, adicionándole 250 ml de una de las concentraciones y se midió (en serie cada tres minutos) la cantidad de solución absorbida por la PAM. Lo mismo se realizó para cada reactivo con sus respectivas concentraciones.
- c) Se evaluó la retención de agua en medios salinos y ácidos a diferentes concentraciones (0.01N, 0.1N y 1N); así como en presencia de fertilizantes; sulfato de amonio para aportar N con una dosis en Kg/ha de 200 para la alta, 120 para la media y 60 para la baja respectivamente, nitrato de potasio para el aporte de K con dosis en Kg/ha de 220 la alta, media 160 y baja 90, y por último el ácido fosfórico para aportar P en Kg/ha de 120 la alta, media 80 y baja 40, en función del tiempo.
- d) Se evaluó la capacidad de absorción de agua en presencia de diferentes dosis de fertilización (con 10 repeticiones), siguiendo la metodología técnica que se reporta arriba; los fertilizantes probados fueron: sulfato de amonio para aportar N con una dosis en Kg/ha de 200 para la alta, 120 para la media y 60 para la baja respectivamente, nitrato de potasio para el aporte de K con dosis en Kg/ha de 220 la alta, media 160 y baja 90, y por último el ácido fosfórico para aportar P en Kg/ha de 120 la alta, media 80 y baja 40. Se realizaron los cálculos de las dosis de fertilización con relación a una recomendación de aplicación comercial del proveedor de 10 Kg de PAM /ha, diluidos en 3 litros de agua.
- e) Se evaluó la retención de humedad (punto de saturación) a tres diferentes dosis de PAM (1.5g para la dosis alta, 1.0g para la media y para la baja de 0.5g y un testigo para cada sustrato) mezclándolo con 300g de cada uno de los suelos. Se le agregó agua en proporciones diferentes ( Arena de río 250 ml, para el Luvisol 250 ml, para el Vertisol 500ml y para el salino-alcalino 300 ml) se dejó en contacto durante 35 minutos, hasta punto de saturación, filtrándose el agua restante para determinar la cantidad retenida en cada suelo.
- f) Para evaluar la absorción de electrolitos y la conductividad eléctrica de la solución permanente tras la exposición con las diferentes dosis de los fertilizantes probados anteriormente. Se tomó una alícuota de 10ml de las soluciones preparadas y se diluyó en 100 ml de agua destilada (10:100); se midió la conductividad eléctrica inicial de la solución. Posteriormente se tomó alícuota con una pipeta graduada de 10 ml a los 10 minutos de haber agregado 1g de PAM y se midió nuevamente su conductividad, de igual manera se hizo para el minuto 30; siguiéndose el mismo procedimiento para las otras dosis de fertilización, método reportado por (Aguirre et al., 1985).

### 2.3.1.3 Cinética de liberación o pérdida de agua por la PAM

Para evaluar el comportamiento de la PAM sobre la liberación de humedad en diferentes medios se llevaron a cabo las siguientes pruebas:

- a) Pérdidas de humedad en función del tiempo con 4 tipos de sustratos (Luvisol, Vertisol, Arena de río y salino-alcálico) con diferentes dosis de PAM (1.5g para la alta, 1.0 para la media y 0.5g para la baja) con los testigos sin PAM, en condiciones de laboratorio.
- b) Se evaluó la cinética de liberación o pérdida de humedad, pesando 1g de PAM en un vaso de precipitado, se adicionó 250 ml de agua destilada. Se dejó en contacto por 24 horas y se midió el porcentaje de humedad retenida como se describió en el punto anterior. Posteriormente se tomaron datos diariamente para determinar por diferencia de pesos los porcentajes de humedad perdida día con día, hasta que la PAM obtuvo su peso inicial.
- c) Se evaluó la cinética de liberación de humedad con 4 suelos o sustratos (300g) de diferentes características (Luvisol, Vertisol, Arena de río y Salino-Alcalino) agregando tres diferentes dosis de PAM para cada suelo (1.5g para la dosis alta, 1.0g para la media, 0.5g para la baja y un testigo para cada sustrato) se colocaron las muestras en contacto con agua hasta punto de saturación aproximadamente a los 35 minutos. Se dejaron las muestras a temperatura ambiente y diariamente se pesaron y por el método de diferencias de peso se determinarán los porcentajes de humedad perdida en cada una de las muestras de los suelos.

En cada uno de los resultados obtenidos se realizaron las regresiones correspondientes de cada gráfica y se interpretaron los parámetros de éstas.

### 2.3.2 Estudios de cinética de retención-pérdida de humedad para los sistemas suelo-PAM-planta: Punto de marchitez permanente

Para evaluar el Punto de Marchitez Permanente, se realizó el experimento con un diseño de bloques completamente al azar, comenzando con una distribución de los suelos dentro de cada bolsa (2 Kg por unidad experimental) con su respectiva dosis de PAM (10g para la alta, 6.6g para la media y la baja 3.3g) para cada tratamiento con sus respectivas repeticiones. Se trasplantó una semana después, colocando una planta de brócoli por cada tratamiento y se agregó riego en abundancia.

Se le permitió a la planta desarrollarse libremente durante 1 mes, con la finalidad de que la raíz cubriera un área considerable dentro de la unidad experimental y poder realizar las evaluaciones. Una vez cumplido el mes se aplicó una lámina de riego de (2 litros) calculada de acuerdo a las pruebas de laboratorio en donde se obtuvo la capacidad de absorción de cada suelo y la PAM; después de esto se suspendieron definitivamente los riegos. Una vez

conducida esta operación (una semana después), se realizaron los muestreos (2 por semana) determinando con esto las pérdidas de humedad en cada tratamiento por semana. Se tomaron 4 muestras por cada unidad experimental a una profundidad aproximada de 15 cm, hasta la profundidad de las raíces. El peso de las muestras fue entre 20 y 40g, colocándose en papel aluminio previamente etiquetado, se llevaron al laboratorio de Química de Suelos y Nutrición Vegetal L-301, donde se obtuvo el peso en húmedo de la muestra en la balanza granataría, colocándose posteriormente en la estufa de secado a 105°C por 24 horas. Una vez realizado este procedimiento se obtuvo el peso en seco de cada muestra y con los datos obtenidos se realizaron los cálculos correspondientes para determinar el porcentaje de humedad en cada tratamiento.

Este procedimiento se realizó 2 veces por semana hasta que coincidieran los pesos de las muestras. La igualación de los pesos se tomó como señal para indicarnos que se había llegado al Punto de Marchitez Permanente en donde la planta ya no puede absorber agua de los suelos, fue entonces cuando se suspendieron los muestreos, el tiempo en que se realizaron fue de 25 días. Se midió en el laboratorio la altura de las plantas y el número de hojas al final del experimento, para que con estos datos se realizaran los análisis estadísticos correspondientes. El procedimiento se llevó a cabo de acuerdo con el método conocido como; Método de campo reportado por Del Valle, (1992).

Se retiraron las plantas de las bolsas (unidades experimentales) para obtener las últimas muestras de los tratamientos, obteniendo los pesos húmedos y secos. En donde la planta fue la que se consideró como indicador para determinar el Punto de Marchitez Permanente

Se registró la altura de las plantas hasta el momento en el que se presentó marchitez total; para tal efecto, se realizaron las mediciones a todas las plantas que sobrevivieron de todas las repeticiones, utilizando el valor promedio para los análisis correspondientes, en donde no se encontró significancia entre los tratamientos.

Los resultados obtenidos de la altura de las plantas, número de hojas y porcentaje final de humedad, se analizaron a través de un análisis de varianza y por comparación de medias, mediante la evaluación de significancia de la prueba (prueba de Tukey) con un valor máximo del 0.05 de probabilidad.

## 2.4 DISEÑO EXPERIMENTAL

El arreglo experimental se llevó a cabo bajo un diseño completamente al azar, y el análisis estadístico se realizó con bloques completamente al azar, cuatro tratamientos con 5 repeticiones por cada suelo, dando como resultado 60 unidades experimentales. Los resultados obtenidos fueron analizados a través de un análisis de varianza y comparación de medias, mediante evaluación de significancia de prueba.

Los tratamientos fueron los siguientes:

Ar<sub>0</sub> (2 Kg. Arena testigo)  
 Ar<sub>1</sub> (2 Kg. Arena con 10 g de PAM)  
 Ar<sub>2</sub> (2 Kg. Arena con 6.6 g de PAM)  
 Ar<sub>3</sub> (2 Kg. Arena con 3.3 g de PAM)

O<sub>0</sub> (2 Kg. Luvisol testigo)  
 O<sub>1</sub> (2 Kg. Luvisol con 10 g de PAM)  
 O<sub>2</sub> (2 Kg. Luvisol con 6.6 g de PAM)  
 O<sub>3</sub> (2 Kg. Luvisol con 3.3 g de PAM)

Ac<sub>0</sub> (2 Kg. Vertisol testigo)  
 Ac<sub>1</sub> (2 Kg. Vertisol con 10 g de PAM)  
 Ac<sub>2</sub> (2 Kg. Vertisol con 6.6 g de PAM)  
 Ac<sub>3</sub> (2 Kg. Vertisol con 3.3 g de PAM)

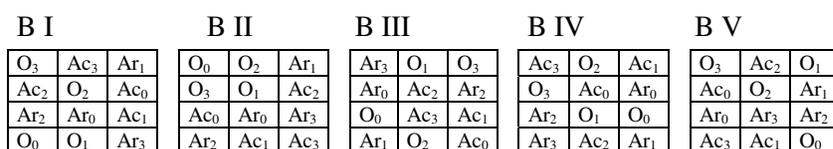


Figura No.7. Arreglo de tratamientos dentro del invernadero.

La distribución de los suelos con la dosis de PAM respectivamente fue realizada dentro del invernadero mediante un diseño experimental completamente al azar, quedando como sigue (Figura. 8)

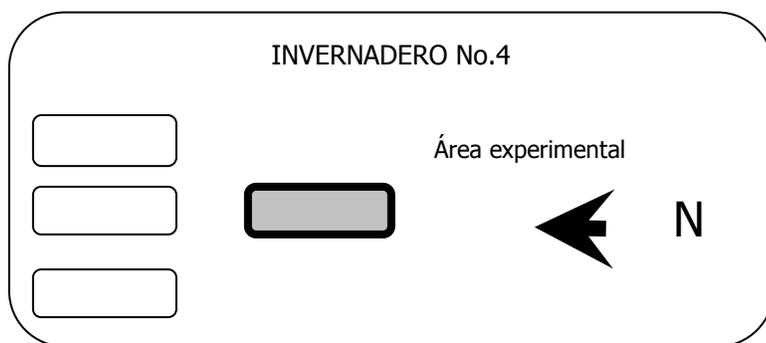


Figura. 8 Ubicación del experimento dentro del invernadero.

### III RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1 CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIONICO

El valor obtenido para la capacidad de intercambio catiónico fue de 360 cmol (+)/g<sup>-1</sup> (meq/100g) de PAM.

#### 3.2 CINÉTICA DE ABSORCIÓN DE AGUA POR LA PAM

##### 3.2.1 Sistema PAM-agua

Para la retención de humedad en el sistema PAM-Agua, en la Figura 9 se puede observar que la PAM mantuvo una ganancia de volumen hasta los 33 minutos de iniciado el aporte de agua destilada (según gráfica) presentando una tendencia positiva. ( $r^2=0.9731$ ) entre el tiempo y la retención de humedad, llegando a establecerse un máximo de absorción, debido a la capacidad de la PAM, con respecto al incremento del tamaño de partícula, siendo un máximo de 168 cm<sup>3</sup>.

Sin embargo, el comportamiento no mantuvo una directriz continua, pues se encontró, conforme la figura 9, que en algunos periodos de tiempo, de 9 min. 12 min. y de 15 a 18, existió una disminución del volumen de la PAM, para posteriormente continuar su incremento. Estas variaciones pueden deberse a la conformación de las partículas de polímeros que tienden a enrollarse, formando un ovillo al azar. Ver gráfica 9

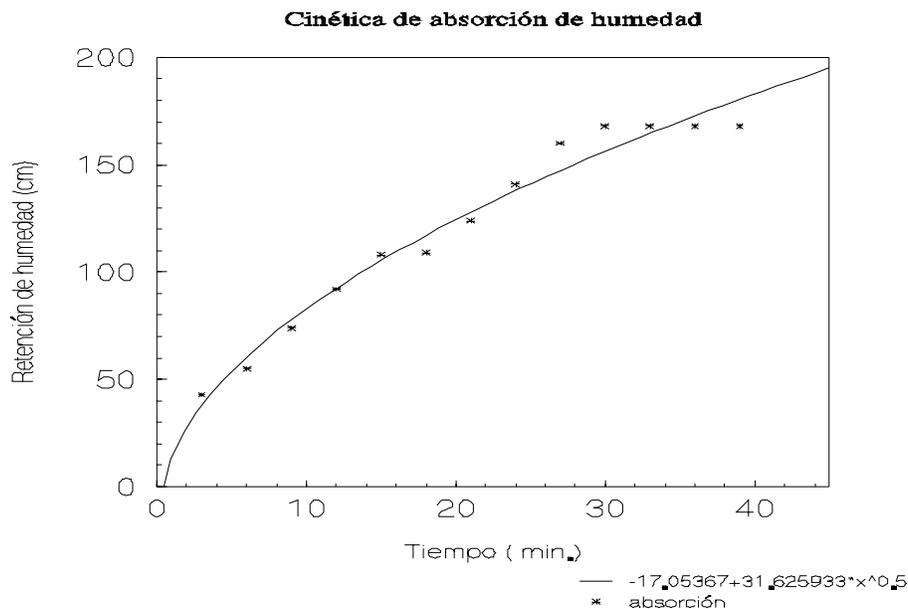


Figura. 9. Gráficas de absorción de agua por la PAM

### 3.2.2 Sistema PAM-agua-HCl

Para la absorción de agua por la PAM en presencia de HCl, la Figura 10 muestra la absorción de agua en concentraciones de HCl (0.01N, 0.1N y 1N). Se observó una trayectoria constante en la concentración 0.01N presentando una tendencia positiva ( $r^2=0.9813$ ), en donde la absorción inicial fue del orden de 14 ml por minuto, hasta el noveno día, donde se observó una interrupción del proceso, para posteriormente iniciarse la absorción, manteniéndose entre 4 y 8 ml por minuto, hasta su saturación en el minuto 30 aproximadamente, en donde a pesar del tiempo y la cantidad de solución no retuvo más.

En cuanto a las concentraciones de 1N y 0.1N de HCl, la PAM mantuvo una absorción constante (recta) con incrementos ligeros de absorción de agua del orden de 7-8ml para 1N y 10-14ml para 0.1N, con una tendencia positiva ( $r^2=0.5387$  para 1N y  $r^2=0.8707$  para 0.1N) en función del tiempo, lo que implica que la PAM no presenta una capacidad de absorción significativa bajo esta condición.

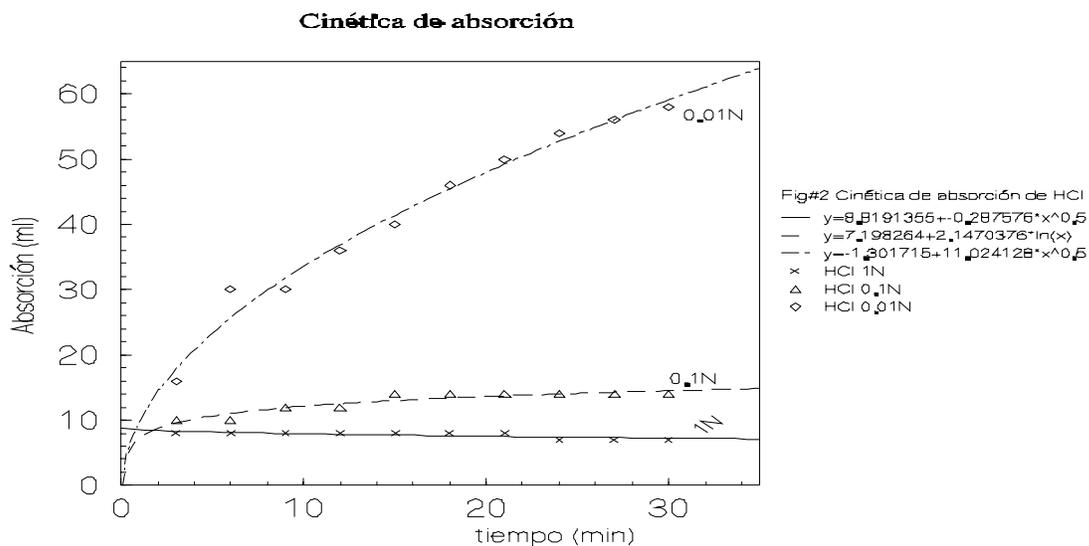


Figura. 10. Cinéticas de absorción de agua por la PAM en presencia de HCl

### 3.2.3 Sistema PAM-Agua-KCl

Para la absorción de agua por la PAM en presencia de un medio salino (KCl). De acuerdo con la figura 11 se pudo observar que la absorción de agua por la PAM fue constante con una tendencia positiva con el tiempo, en todas las concentraciones de KCl ( $r^2=0.9733$  para 0.01N,  $r^2=0.9833$  para 0.1N y  $r^2=0.9479$  para 1N). Se encontró que a menor concentración, se presentó mayor absorción, de tal forma que con la concentración de 0.01N se observó que hubo una mayor cantidad de absorción en los primeros 3 minutos, de 22ml de solución y se mantuvo esta hasta el minuto 6, donde volvió a acelerarse la absorción reteniendo 16ml y hasta el minuto 9, y de ahí se mantuvo una constancia en la retención entre 8 y 10 ml empezando a saturarse a partir de los minutos 24 al 30. Bajo los tratamientos con concentraciones de 0.1N y 1N la absorción fue menor pero constante, manteniéndose entre 2 y 6ml, e iniciando su saturación a partir del minuto 21 y finalizando en el minuto 30, en donde se llegó a una máxima capacidad de absorción. A pesar del tiempo y de la cantidad de solución, no hubo mayor retención. Esto se debe a la alta competencia que se presenta entre la PAM y las sales, por el agua, a medida que esta última es cada vez más y más absorbida por el polímero. Ver gráfica 11.

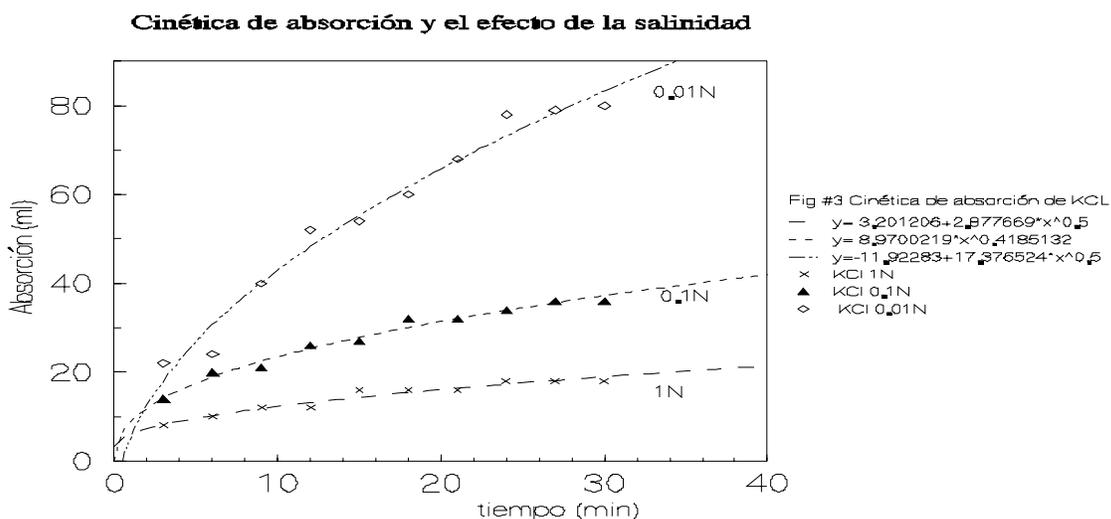


Figura. 11. Gráficas de cinética de absorción de agua por la PAM en presencia de KCl

### 3.2.4 Sistemas PAM-fertilizantes

#### 3.2.4.1 Nitrato de amonio

Para la retención de agua por la PAM en función del fertilizante Nitrato de amonio. En cuanto a la absorción con tres concentraciones de nitrato de amonio (alta, media y baja) se observó que a partir de los periodos que comprendieron del minuto 12 al 21 existió una disminución en la retención de solución en las tres concentraciones (figura 12). Posteriormente no se incrementó significativamente esta, obteniéndose una retención entre 2 y 3 ml por minuto como máximo. En el minuto 30 ya no se presentó ningún incremento, a pesar de estar presente la solución; sin embargo, se tuvo una tendencia positiva en las tres concentraciones con correlaciones de  $r^2=0.9709$  para la alta;  $r^2=0.8889$  para la media y  $r^2=0.9761$  para la baja concentración.

Con este compuesto ( $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ), se tuvo mayor velocidad de absorción que con el sulfato de amonio, saturándose 9 minutos antes que con la otra fuente, lo cual es consistente en los datos arrojados por los tratamientos con soluciones salinas y ácidas.

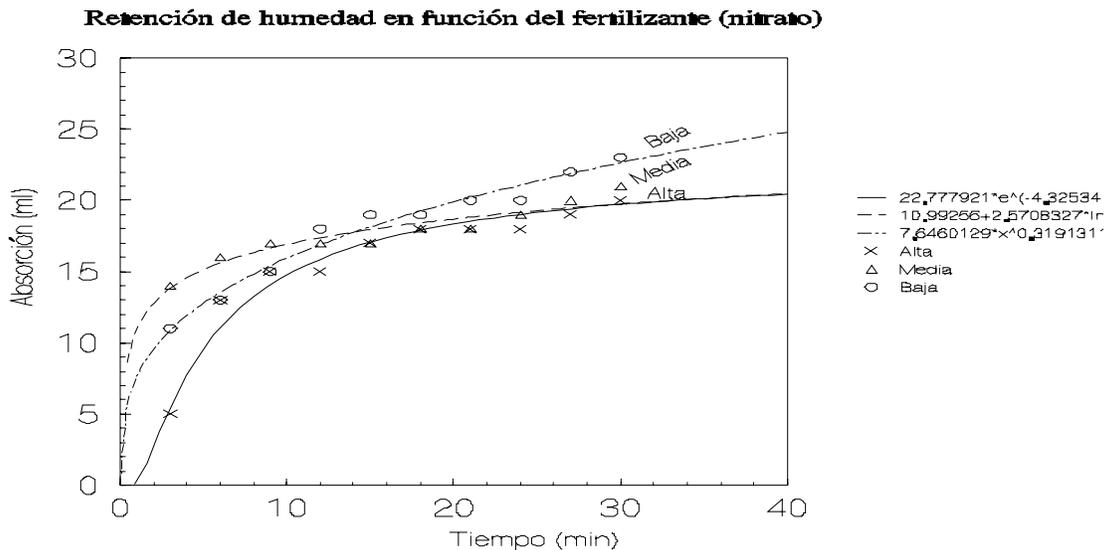


Figura. 12. Gráficas de absorción de agua por la PAM con presencia de Nitrato de amonio.

### 3.2.4.2 Sulfato de amonio

Para la retención de agua por la PAM en función del fertilizante sulfato de amonio, la absorción de humedad con tres concentraciones de sulfato de amonio (alta, media y baja) mostró una tendencia logarítmica en las concentraciones alta y baja (figura 13). Se observó que en los intervalos de tiempo de 15 a 21 minutos no existió un aumento significativo en la retención de humedad, encontrándose la máxima absorción en la concentración alta de 17 cm<sup>3</sup>, en la media de 20 cm<sup>3</sup> y en la baja de 23cm<sup>3</sup> en el minuto 30, en donde se observó una diferencia de absorción entre cada una de las tres concentraciones de 3 cm<sup>3</sup>. Las curvas presentan una tendencia positiva de alta correlación para la concentración alta de  $r^2 = 0.91$ ,  $r^2 = 0.95$  para la media,  $r^2 = 0.96$  para la baja, entre el tiempo de retención de humedad. Esto se debe a la cantidad de sales presentes en la solución, lo cual debido al bajo potencial osmótico presentado cuando disminuye su capacidad de absorción, como puede denotarse en el tratamiento con la concentración alta a medida que la solución salina se concentra (figura 13).

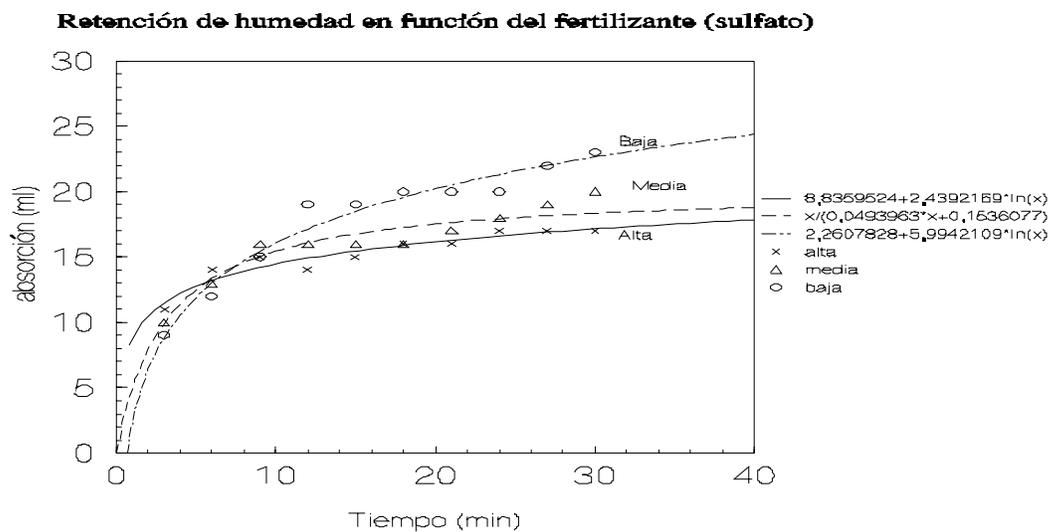


Figura. 13. Gráficas absorción de agua por la PAM en función del fertilizante Sulfato de amonio.

### 3.2.4.3 Ácido fosfórico

En el sistema de retención de agua por la PAM, en función del fertilizante ácido fosfórico, presentó en todos los casos, una tendencia de comportamiento positiva entre el volumen absorbido y el tiempo, dando valores de  $r^2=0.9403$  para la dosis alta,  $r^2=0.8029$  para la dosis media y  $r^2=0.9761$  para la dosis baja. Sin embargo, se encontraron diferencias importantes ver figura 14. En el tratamiento con la concentración media, se tuvo una saturación a los 6 minutos de haber iniciado el aporte del ácido; mientras que las concentraciones baja y alta mantuvieron un comportamiento irregular, pues se encontraron periodos de ganancia de solución y lapsos de tiempo que no presentaron ningún incremento. Los tratamientos con solución alta detuvieron la absorción a partir el minuto 27 y los de la baja a los 24 minutos.

A pesar de que los tratamientos de la solución alta tardaron más tiempo en llegar a un punto de saturación, tuvieron una ligera y menor absorción que los de la baja (2 ml), no siendo consistente el hecho que a mayor tiempo, se vio favorecida la cantidad de solución que pudo ingresar a la PAM. Además, el comportamiento, si bien fue similar a la aplicación con HCl en cuanto a que la menor concentración tuvo mayor absorción (figura 14), no fue igual a lo mostrado en las concentraciones medias.

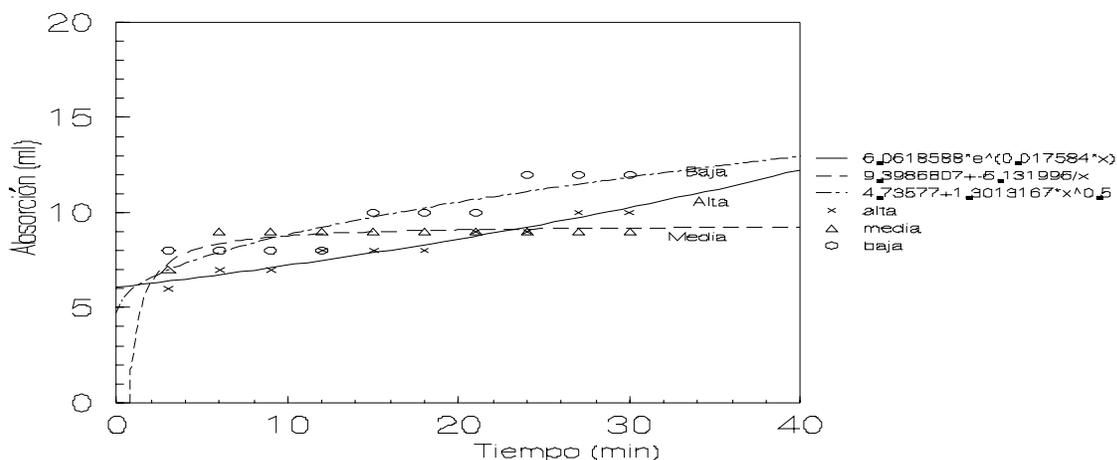


Figura. 14. Gráficas de retención de agua por la PAM en función del fertilizante ácido fosfórico.

### 3.3 CINÉTICA DE LIBERACIÓN O PÉRDIDA DE AGUA POR LA PAM

#### 3.3.1 Sistema PAM-agua

En los estudios de liberación para el sistema PAM-agua la figura 15 muestra las pérdidas de humedad, en donde se mantuvo una directriz continua y casi lineal, en general, con una tendencia positiva directa con valores de correlación ( $r^2= 0.9955$ ) con el tiempo. En promedio, la pérdida de agua fue de 7 a 9 ml por día en los primeros períodos, hasta el décimo día; mientras que del decimosegundo al decimoquinto día, se presentó mayor pérdida de humedad, aproximadamente de 11 ml/día, hasta la etapa final, en donde la PAM comenzó a contraerse, regresando a su característica inicial pulverizada, una vez que perdió toda la humedad absorbida.

Por el comportamiento presentado por la PAM, se comprobó una de las características principales que reporta la bibliografía sobre este material, que es la de expandirse hasta su máxima capacidad en presencia de agua y en función del tiempo irse contrayendo, cualidad que le confiere su estructura química, según lo descrito por Lara (1993).

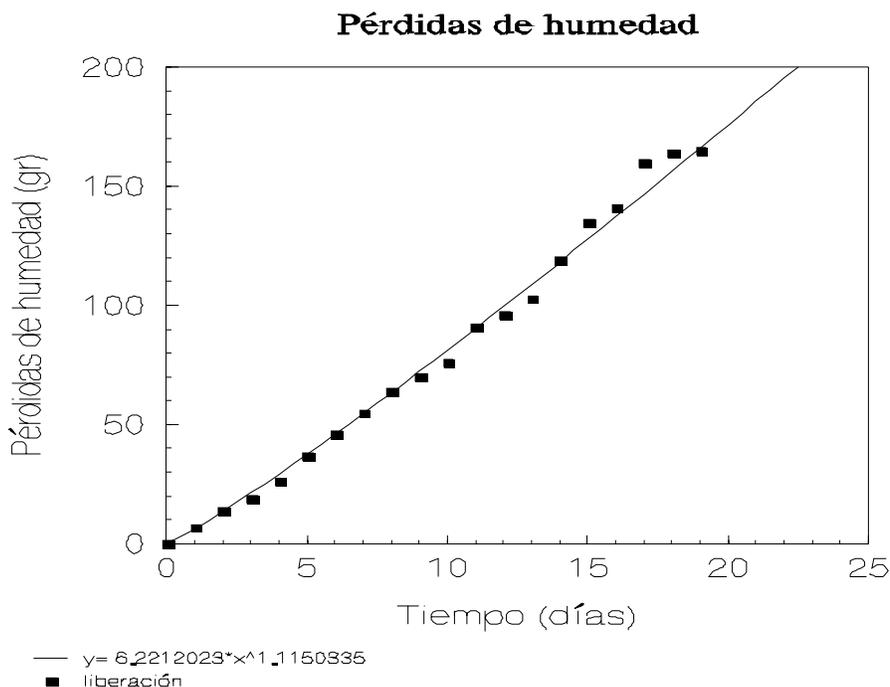


Figura. 15. Gráficas de las pérdidas de agua por la PAM

### 3.3.2 Sistemas PAM-Suelo

#### 3.3.2.1 Arena de río

En el sistema de liberación de humedad de la PAM con el sustrato Arenoso, la pérdida de humedad mantuvo una directriz constante de agua en función del tiempo en todos los tratamientos (gráfica 16). Sin embargo, en el testigo las pérdidas de humedad se dieron en función del tiempo y de las características físicas del suelo, teniendo una pérdida de peso de 4.3 a 7.5 g. por día en los primeros 12 días, disminuyendo hasta 0.2 g por día, en donde ya no existió ninguna diferencia de peso, revelando que ya no había agua retenida por el suelo. Se pudo comprobar que la pérdida de humedad tuvo una duración de 24 días en el testigo, y que en los tratamientos con dosis de PAM mantuvieron la humedad por periodos de tiempo de 35 días para la dosis media y baja, mientras que para la dosis alta fue de 39 días.

Las diferencias en retención de humedad finales en comparación con los tratamientos con el testigo fueron de 53.4 g para la dosis alta, 34g para la dosis media y 13.1g para la mezcla con la baja cantidad de PAM. Todo lo anterior nos indica que la aplicación de PAM incrementó favorablemente la absorción de agua, conservándola por períodos de tiempo más prolongados, a dosis de PAM bajas, este sustrato presenta bajas capacidades de retención de humedad.

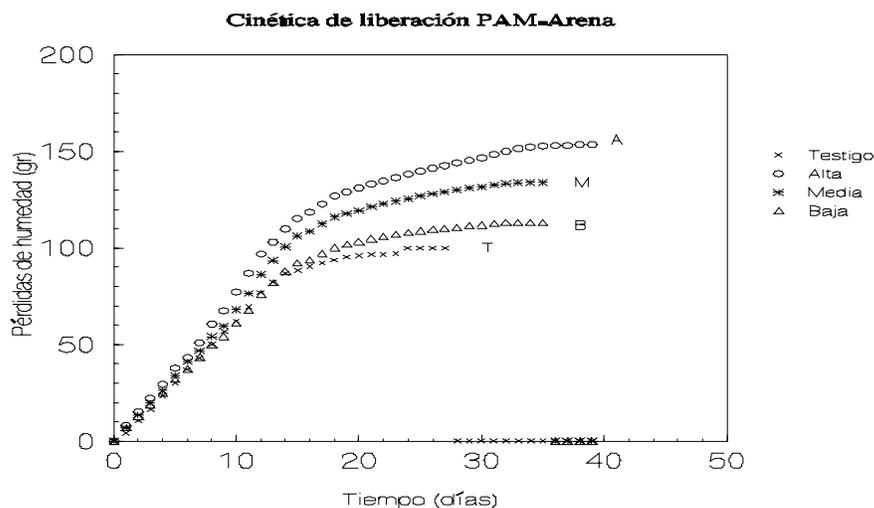


Figura. 16. Gráficas de liberación de humedad de la PAM en Arena de río.

### 3.3.2.2 Suelo arcilloso (Vertisol)

En el sistema de liberación de humedad de la PAM en el suelo Vertisol, los tratamientos mostraron una tendencia constante en pérdida de humedad, en función del tiempo (figura 17). La humedad tardó en perderse 39 días, encontrándose diferencias en la cantidad final de humedad entre el testigo y las demás dosis. Si comparamos el testigo con las mezclas con PAM, se encuentran diferencias de 59.4, 40.6 y 22.4g para dosis alta, media y baja, respectivamente, lo que indica que el incremento en la cantidad de humedad retenida, está en relación de la proporción de PAM aplicada.

Al comparar la cantidad de humedad final contra el tiempo en que se pierde, tanto de la arena de río, como del suelo arcilloso, se encontró que los periodos de tiempo de conservación de la humedad fueron mayores en el suelo arcilloso hasta por 15 días a diferencia del sustrato arenoso, lo cual manifiesta la importancia de las características físicas de cada uno de los suelos.

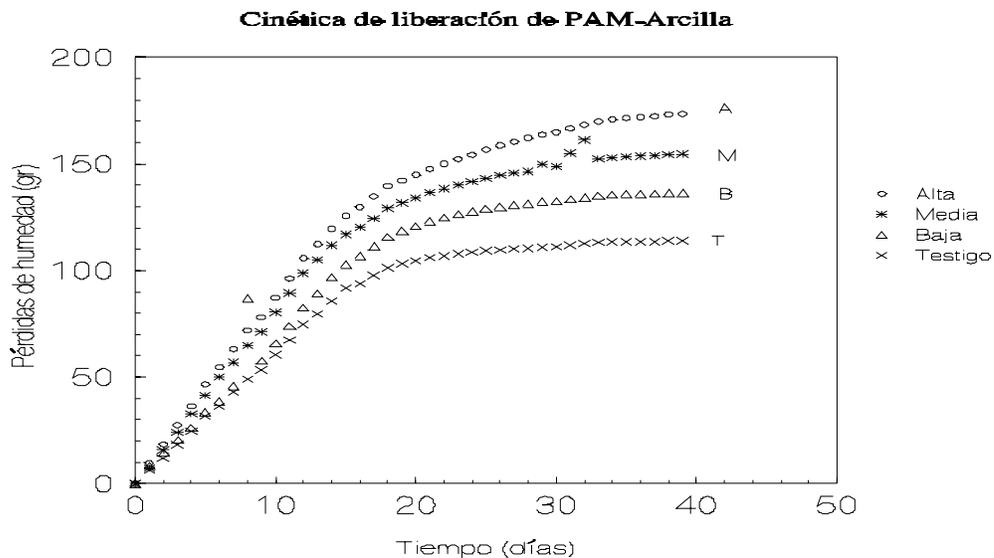


Figura. 17. Gráficas de liberación de humedad de la PAM en un suelo arcilloso (Vertisol).

### 3.3.2.3 Suelo oxídico (Luvisol)

En el sistema PAM- suelo Luvisol, la liberación de humedad en todos los tratamientos se mantuvo constante según figura 18. El tratamiento testigo mostró a partir del día 33 que se estabilizó, y hasta el día 39 no mostró cambio alguno en la pérdida de humedad. El resto de los tratamientos siguieron perdiendo humedad hasta el día 39, puesto que ya no hubo modificación en la liberación de agua.

En igual comportamiento de las mezclas con arena y arcilla, el sistema PAM-luvisol, la dosis alta mantuvo mayores valores de humedad del orden de 25.9g en comparación con el tratamiento del testigo, lo que indicó que la retención de agua se debió principalmente a la aplicación del polímero. Concerniente a los tratamientos medio y bajo, si bien la retención de humedad fue menor que la dosis alta, esta fue mayor que en el testigo en 13.9 y 11.4g respectivamente, (figura 18).

Al comparar los datos arrojados del comportamiento de los dos suelos anteriores (arena y arcilla) con el suelo luvisol, se comprobó que la humedad final retenida por la arena de río fue mayor que los demás, debido a la presencia de la PAM, lo cual puede deberse a que al absorber el agua del suelo, se incrementa el volumen del polímero y al aglutinarse mediante las uniones de distinta naturaleza a las partículas del suelo, cierra los poros, disminuyendo la pérdida por evaporación; mientras que en suelos con textura arcillosa, crea mayor espacio de macroporos, incrementando la evaporación y por tanto pérdida de agua (Canizal, 1993).

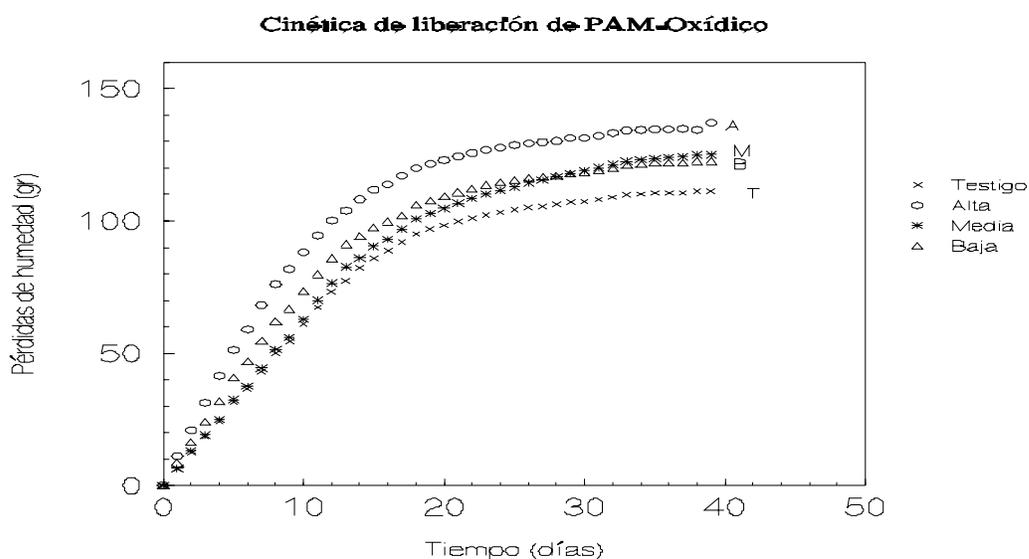


Figura. 18. Gráficas de liberación de humedad de la PAM en un suelo oxídico (Luvisol).

### 3.3.2.4 Suelo salino-alkalino (Solonetz)

El sistema de liberación de humedad por la PAM en el suelo Salino-alkalino, las pérdidas de humedad en los tratamientos se mantuvieron constantes en función del tiempo (figura 19), mostrando una ganancia positiva en la cantidad de humedad final para la dosis alta de 26.4g, 11.3g para la media y para la baja de 5.3g, con respecto al testigo, aunque el tipo de duración de la humedad fue la misma para todos los tratamientos, 39 días. Estos resultados se ven limitados por las cantidades de sales contenidas en el suelo, que pueden provocar la disminución en la cantidad de agua que la PAM puede absorber, según se mostró en los experimentos anteriores

La PAM según estos estudios puede dar resultados muy alentadores en la recuperación de suelos con estas características de escasez de agua, al favorecer la formación de agregados, y con esto lograr prolongar e incrementar los contenidos de agua (Lara, 1993).

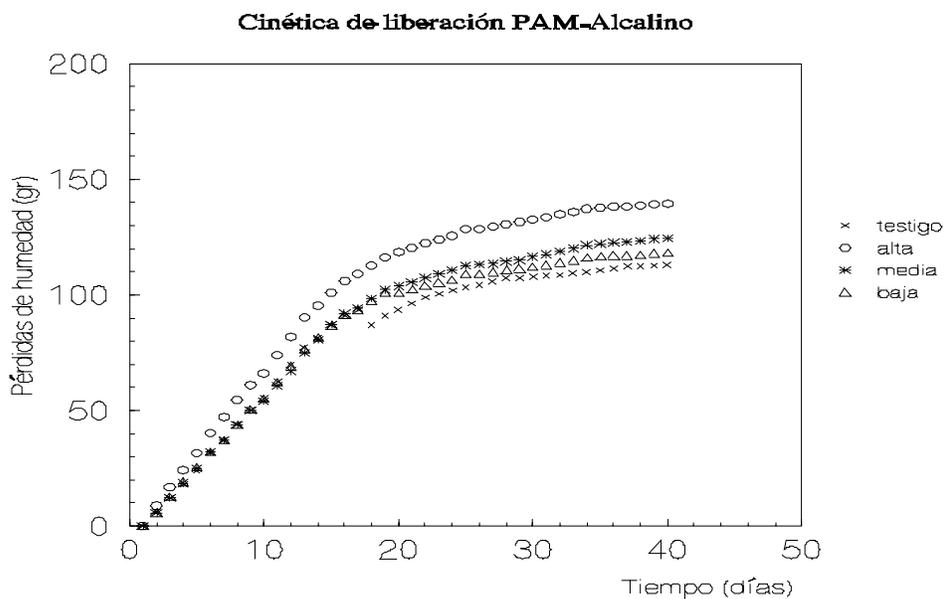


Figura. 19. Gráficas de liberación de humedad por la PAM en un suelo salino-alkalino (Solonetz).

### 3.4 ESTUDIOS DE CINÉTICA DE RETENCIÓN-PÉRDIDA DE HUMEDAD PARA LOS SISTEMAS SUELO-PAM-PLANTA: PUNTO DE MARCHITEZ PERMANENTE

Se hace referencia que para el caso del suelo salino-alcálico (Solonetz) no se pudo evaluar debido a que el efecto en la planta no permitió su crecimiento, esta consecuencia de la alta salinidad, por lo tanto, solo se reportan los tres casos restantes con los sustratos Arena de río, arcilloso (Vertisol) y Oxídico (Luvisol).

#### 3.4.1 Arena de río

El porcentaje de humedad retenido-liberado por la PAM en el sustrato arenoso con presencia de planta, de acuerdo con el comportamiento que manifiestan las gráficas sobre humedad final, en los tratamientos con planta indicadora, se observa que la pérdida de agua fue menor conforme mayor fue la dosis del polímero, esto durante los primeros 5 días después de haber saturado el sustrato. A partir de esta fecha, el tratamiento con la baja concentración fue similar al tratamiento testigo, llegando a una total pérdida de humedad; pero en los otros dos tratamientos, aunque la humedad fue disminuyendo no llegó a presentar la total pérdida de la humedad. En cuanto a la planta indicadora, se presentaron síntomas de total marchitez a partir de los 21 días en todos los tratamientos. Los datos proyectados mostraron que el porcentaje final de humedad en el tratamiento con la dosis alta, mantuvo una humedad de 36.1% al final de los muestreos; teniendo una diferencia del orden de 19.9% con respecto al testigo, el cual fue el que mayor pérdida de humedad mostró, figura 20.

Al comparar los períodos de tiempo que se obtuvieron para la completa liberación de agua sin planta, se observaron cifras de 39 días para la dosis alta y media y con planta de 27 días, encontrando una diferencia de 12 días menos con humedad. Con el tratamiento de la dosis baja, la pérdida de humedad fue mayor, presentando humedad solo por 35 días, pero con planta fue de 17 días, encontrando una diferencia de 18 días solo para ellos. Para el caso del tratamiento testigo, se tuvo una diferencia de 7 días entre aquellos que no tenían planta (24 días con humedad), contra aquellos con el vegetal (17 días), valores similares a lo mostrado con la dosis baja.

La mayor pérdida de agua de los sustratos con planta debió producirse por efecto de la transpiración de las plantas, que incrementó los consumos de agua en campo, con respecto a los tratamientos testigos donde la evaporación llevó el mismo mecanismo de pérdida de agua.

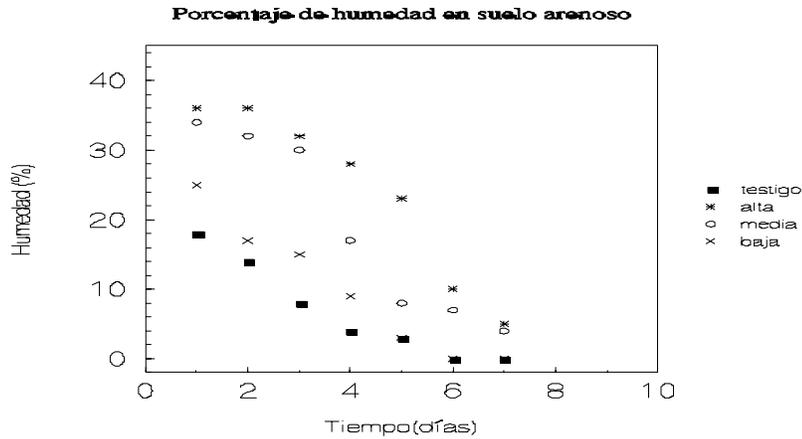


Figura. 20. Gráficas de porcentaje de humedad por la PAM en Arena de río con presencia de planta.

En el cuadro A-1 se muestran los datos del análisis estadístico del porcentaje de humedad en arena de río con mezcla de PAM, donde no se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos, por lo tanto se acepta la Ho.

Fuente de variación	Grados de libertad (gl)	Suma de cuadrados (SC)	Cuadrado medio (Cm.)	F observado	F requerido	
					5%	1%
Total	19	739.20				
Tratamientos	3	560.15	186.71	16.68	3.24	5.29
Error	16	179.05	11.19			

Cuadro A-2 Separación de medias a través de la prueba de Tukey del porcentaje de humedad en arena de río con mezcla de PAM.

Dosis	Resultados	
<b>Alta</b>	23.56–17.53	a
<b>Media</b>	19.04–13.01	ab
<b>Baja</b>	13.71–7.68	b
<b>Testigo</b>	9.58–3.55	c

### 3.4.2 Suelo arcilloso (Vertisol)

Con respecto al suelo Vertisol los porcentajes de humedad en presencia de PAM y planta, las pérdidas de humedad en todos los tratamientos (testigo, alta, media y baja) se mantuvieron constantes en función del tiempo (figura 21). Sin embargo, los datos son diferentes a los arrojados por los tratamientos con arena, pues el testigo obtuvo la mayor cantidad de humedad final en comparación con los demás tratamientos 57.98%, aunque, el tiempo que mantuvo dicha humedad fue menos prolongado, solo de 17 días. El tratamiento que mantuvo por más tiempo la humedad aprovechable para la planta fue el de la dosis media con 25 días, con un porcentaje de 56.76%. Esto reafirma la importancia de las características físicas del suelo que influyen en la retención de humedad, cuando se aplica la Poliacrilamida.

Es evidente que la respuesta de la planta a la aplicación de PAM es más clara y favorable en la medida que las condiciones del suelo sean adversas para la retención de humedad, además es necesario que exista deficiencia de agua, para que se justifique el uso de los polímeros.

En este caso el suelo arcilloso se caracteriza por retener grandes cantidades de agua, por lo que la PAM actúa mejor en suelos con deficiencias de este líquido, como se observó en las pruebas con arena de río, en donde el porcentaje de humedad se incrementó y se mantuvo por períodos de tiempo similares a los de la arcilla, los porcentajes tuvieron una ligera y menor absorción, no significativa. Ver figura 16 y 17.

Al comparar los resultados de las pruebas que se realizaron para las pérdidas de agua con el mismo suelo, se presentó la existencia de un diferencial en el período de tiempo que se mantuvo la humedad. Estas diferencias se obtuvieron principalmente en los tratamientos testigos, con y sin planta, con respecto a la cantidad final de humedad se encontró que fue de 22 días menos de agua en comparación con el tratamiento que tiene la planta.

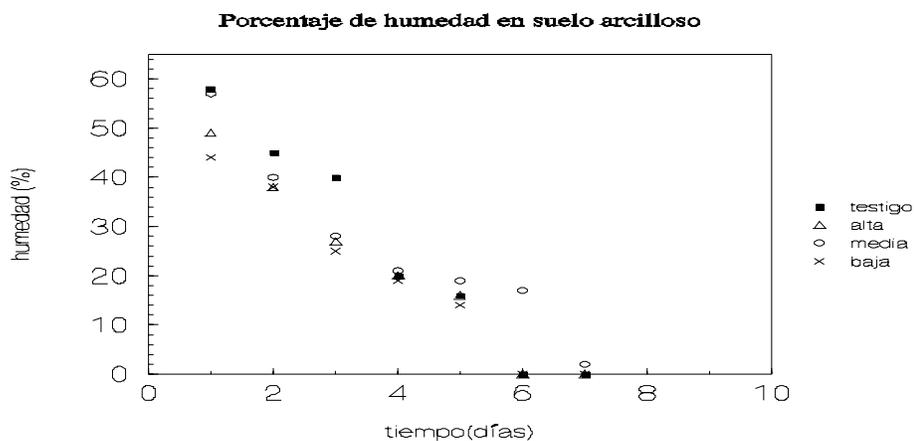


Figura. 21. Gráficas de porcentaje de humedad de la PAM en suelo arcilloso (Vertisol) con presencia de planta.

En el cuadro A-3 se muestran los resultados obtenidos en el análisis estadístico del porcentaje de humedad en el suelo arcilloso (Vertisol) con mezcla de PAM, donde existe diferencia significativa en los tratamientos, por lo tanto se acepta la  $H_0$ .

Fuente de variación	Grados de libertad (gl)	Suma de cuadrados (SC)	Cuadrado medio (Cm.)	F observado	F requerido	
					5%	1%
Total	19	750.3				
Tratamientos	3	176.9	58.96	1.64	3.24	5.29
Error	16	573.4	35.83			

Cuadro A-4 Separación de medias a través de la prueba de Tukey del porcentaje de humedad en el suelo arcilloso (Vertisol) con mezcla de PAM.

Dosis	Resultados	
<b>Testigo</b>	35.75–29.03	a
<b>Media</b>	32.95–26.23	ab
<b>Alta</b>	29.86–23.14	ab
<b>baja</b>	27.95–21.23	b

### 3.4.3 Suelo oxídico (Luvisol)

Con respecto al porcentaje de humedad de la PAM en suelo Luvisol con presencia de planta, los resultados obtenidos por los tratamientos fueron de un comportamiento constante en todos ellos (testigo, alta, media y baja) (figura 22); siendo para el testigo para el que se obtuvieron los menores valores. La diferencia entre los tratamientos no fue grande manteniéndose valores entre 53 y 61%, con respecto al testigo para el que hubo una discrepancia de 27.9% con referencia al de la dosis media, que mostró el mayor valor (figura 22).

En cuanto al período de retención de humedad para los diferentes tratamientos, los resultados mostraron que el testigo mantuvo el menor tiempo de retención de agua (figura 22), 18 días, mientras que, para aquellos donde se aplicó PAM fue de 25 días, confirmando que el polímero coadyuva a mantener la humedad en los suelos. Sin embargo, es importante considerar que los altos contenidos de Fe pueden limitar el crecimiento de las plantas, debido a la fijación de P, limitando la estimulación y diferenciación de raíces y provocando que las pérdidas de humedad por la transpiración disminuyan y ayuden a mantener el agua por más tiempo.

Se comparó la liberación de humedad con y sin la planta en el mismo suelo y se obtuvieron diferencias en los testigos, de 22 días menos de agua para el tratamiento con planta, con referencia al tratamiento sin planta. En todas las mezclas con PAM hubo una diferencia de 15 días menos de humedad en los tratamientos con planta con relación a los tratamientos sin planta. Sin embargo cabe destacar que en este caso la mayor cantidad de humedad perdida se debió principalmente a la evaporación más, que a la transpiración.

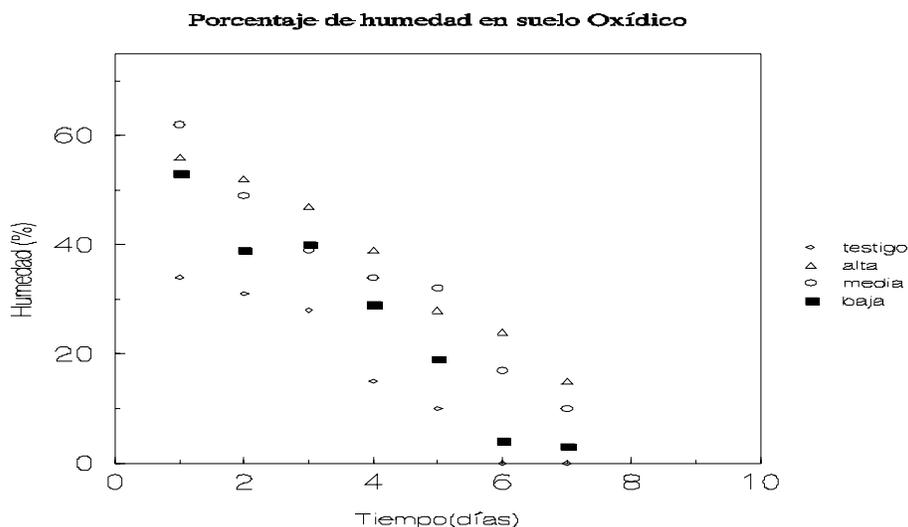


Figura. 22. Gráficas de porcentaje de humedad de la PAM en un suelo oxídico (Luvisol) con presencia de planta.

En el cuadro A-5 se muestran los datos del análisis estadístico del porcentaje de humedad en el suelo oxídico (Luvisol) con mezcla de PAM, donde no encontramos diferencias significativas entre los tratamientos, por lo tanto se acepta la  $H_0$ .

Fuente de variación	Grados de libertad (gl)	Suma de cuadrados (SC)	Cuadrado medio (Cm.)	F observado	F requerido	
					5%	1%
Total	19	1,169				
Tratamientos	3	640.1	213.36	6.45	3.24	5.29
Error	16	528.9	33.05			

Cuadro A-6 Separación de medias a través de la prueba de Tukey del porcentaje de humedad en el suelo oxídico (Luvisol) con mezcla de PAM.

Dosis	Resultados	
<b>Alta</b>	37.25–26.85	a
<b>Media</b>	37.08–26.68	a
<b>Baja</b>	35.22–24.82	a
<b>Testigo</b>	23.58–13.18	b

### 3.5 ESTUDIOS SOBRE EL EFECTO DE LOS PARÁMETROS MORFOLÓGICOS

#### 3.5.1 Análisis estadísticos

Se midió la pérdida de humedad en el sistema suelo-PAM-planta y se tomaron altura de planta y número de hojas como parámetros no determinados.

En el cuadro A-7 se muestran los datos de los análisis estadísticos de la altura final de la planta de brócoli en arena de río con mezcla de PAM, donde se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos, por lo tanto se rechaza la Ho.

Fuente de variación	Grados de libertad (gl)	Suma de cuadrados (SC)	Cuadrado medio (Cm.)	F observado	F requerido	
					5%	1%
Total	19	312.2				
Tratamientos	3	109.8	36.60	2.89	3.24	5.29
Error	16	202.4	12.65			

Cuadro A-8 Separación de medias a través de la prueba de Tukey de la altura final de las plantas de brócoli en arena de río con mezcla de PAM.

Dosis	Resultados	
<b>Alta</b>	15.6–12.73	a
<b>Media</b>	15.0–12.13	a
<b>Baja</b>	13.0–10.13	ab
<b>Testigo</b>	9.60–6.73	b

En el cuadro A-9 se muestran los datos de los análisis estadísticos de la altura final de la planta de brócoli en suelo arcilloso (Vertisol) con mezcla de PAM, en donde se encontró que hay diferencias significativas entre los tratamientos, por lo tanto se rechaza la Ho.

Fuente de variación	Grados de libertad (gl)	Suma de cuadrados (SC)	Cuadrado medio (Cm.)	F observado	F requerido	
					5%	1%
Total	19	112.60				
Tratamientos	3	27.00	9	1.67	3.24	5.29
Error	16	85.60	5.35			

Cuadro A-10 Separación de medias a través de la prueba de Tukey de la altura final de las plantas de brócoli en suelo arcilloso (Vertisol) con mezcla de PAM.

Dosis	Resultados	
<b>Media</b>	14.6–14.30	a
<b>Alta</b>	14.4–13.93	a
<b>Baja</b>	12.4–11.93	b
<b>Testigo</b>	12.0–11.53	b

En el cuadro A-11 se muestran los datos de los análisis estadísticos de la altura final de la planta de brócoli en suelo oxídico (Luvisol) con mezcla de PAM, en donde se encontró que hay diferencias significativas entre los tratamientos, por lo tanto se rechaza la  $H_0$ .

Fuente de variación	Grados de libertad (gl)	Suma de cuadrados (SC)	Cuadrado medio (Cm.)	F observado	F requerido	
					5%	1%
Total	19	50.45				
Tratamientos	3	10.15	3.38	1.34	3.24	5.29
Error	16	40.30	2.51			

Cuadro A-12 Separación de medias a través de la prueba de Tukey de la altura de las plantas de brócoli en suelo oxídico (Luvisol) con mezcla de PAM.

Dosis	Resultados	
<b>Alta</b>	4.60–3.96	a
<b>Media</b>	4.40–3.76	a
<b>Baja</b>	3.20–2.56	b
<b>Testigo</b>	3.20–2.56	b

En el cuadro A-13 se muestran los datos de los análisis estadísticos de la cantidad final de hojas de la planta de brócoli en arena de río con mezcla de PAM, en donde se encontró que hay diferencias significativas entre los tratamientos, por lo tanto se rechaza la Ho.

Fuente de variación	Grados de libertad (gl)	Suma de cuadrados (SC)	Cuadrado medio (Cm.)	F observado	F requerido	
					5%	1%
Total	19	32.20				
Tratamientos	3	9.00	3	1.55	3.24	5.29
Error	16	23.20	1.45			

Cuadro A-14 Separación de medias a través de la prueba de Tukey de la cantidad final de hojas de la planta de brócoli en arena de río con mezcla de PAM.

Dosis	Resultados	
<b>Media</b>	6.00–3.22	a
<b>Baja</b>	5.60–2.02	a
<b>Alta</b>	4.40–3.42	a
<b>Testigo</b>	4.20–3.82	a

En el cuadro A-15 se muestran los datos de los análisis estadísticos de la cantidad final de hojas de la planta de brócoli en suelo arcilloso (Vertisol) con mezcla de PAM, en donde se encontró que hay diferencias significativas entre los tratamientos, por lo tanto se rechaza la Ho.

Fuente de variación	Grados de libertad (gl)	Suma de cuadrados (SC)	Cuadrado medio (Cm.)	F observado	F requerido	
					5%	1%
Total	19	5.8				
Tratamientos	3	1.0	0.33	1	3.24	5.29
Error	16	4.8	0.33			

Cuadro A-16 Separación de medias a través de la prueba de Tukey de la cantidad final de hojas de la planta de brócoli en suelo arcilloso (Vertisol) con mezcla de PAM.

Dosis	Resultados	
<b>Media</b>	6.24–6.29	a
<b>Alta</b>	6.20–6.09	a
<b>Testigo</b>	6.00–5.89	b
<b>Baja</b>	5.80–5.69	b

En el cuadro A-17 se muestran los datos de los análisis estadísticos de la cantidad final de hojas de la planta de brócoli en suelo oxídico (Luvisol) con mezcla de PAM, en donde no se encontró que hay diferencias significativas entre los tratamientos, por lo tanto se acepta la  $H_0$ .

Fuente de variación	Grados de libertad (gl)	Suma de cuadrados (SC)	Cuadrado medio (Cm.)	F observado	F requerido	
					5%	1%
Total	19	18.50				
Tratamientos	3	8.55	2.85	4.5	3.24	5.29
Error	16	10.00	0.62			

Cuadro A-18 Separación de medias a través de la prueba de Tukey de la cantidad final de hojas de la planta de brócoli en suelo oxídico (Luvisol) con mezcla de PAM.

Dosis	Resultados	
<b>Media</b>	7.6–6.32	a
<b>Alta</b>	6.8–5.52	a
<b>Baja</b>	6.0–4.72	b
<b>Testigo</b>	5.8–4.52	b

### 3.5.2 Análisis de resultados

El efecto de la PAM en la retención de humedad de los suelos ensayados, se evaluó con base en algunos parámetros registrados (número de hojas, altura de plantas y porcentaje de humedad de los sustratos) de las plantas utilizadas como indicadores.

Con base en los resultados obtenidos de la separación de medias a través de la prueba de Tukey (con un valor de significancia del 0.05%), se encontró que el número de hojas de las plantas de brócoli en arena de río, no mostró diferencias estadísticas entre los tratamientos (cuadro A-7). Esto indica que la aplicación de PAM en diferentes dosis no influyó en la cantidad de hojas.

El comportamiento de la PAM bajo el tratamiento con suelo Vertisol, en cuanto al número de hojas, se encontró que las dosis alta y media mostraron valores estadísticamente iguales, y que los tratamientos con la dosis baja y testigo presentaron un comportamiento similar, pero menor. Ver (cuadro A-8), puede decirse que existe una diferencia mínima significativa entre los tratamientos con la dosis alta y media, y con la baja y testigo. Este comportamiento indica que a mayor cantidad de PAM se produce mayor cantidad de hojas, en comparación con la dosis baja o nula.

En lo que se refiere al número de hojas en el suelo Luvisol cuadro (A-9) se mostraron diferencias significativas en los tratamientos dosis alta y media en comparación con la dosis baja y el testigo, pero no entre dosis alta y media, esto obteniéndose de las pruebas de comparación de medias. Estos resultados hasta cierto punto son lógicos ya que una mayor cantidad de PAM en el suelo refleja mayor cantidad de humedad.

Para los estudios de altura de planta bajo los diferentes suelos y en las dosis de PAM aplicadas para cada uno de los resultados (cuadro A-9, A-10, y A-11) se obtuvo de la prueba de medias que no existieron diferencias significativas entre los tratamientos, debido a que la dosis alta y media presentaron igual comportamiento, que el testigo y la dosis baja.

La altura de planta está relacionada con la nutrición. En el experimento no se aplicó una fertilización, lo que limitó el crecimiento de las plantas, aun en presencia de humedad aportada por la PAM/suelo.

Con base en los resultados obtenidos para el porcentaje de humedad en los suelos, por separación de medias a través de la prueba de Tukey (con un valor de significancia del 0.05%), se encontró que en el sustrato arenoso la dosis alta y media fueron estadísticamente similares (cuadro A-11), presentando comportamientos similares. Sin embargo se encontraron diferencias significativas al incrementarse el porcentaje de humedad en el suelo con la dosis alta de 59.34%, mientras que para la dosis media de 40.15% y para la baja de 17.53%, en comparación con el testigo. Esto indica que los incrementos en los porcentajes de humedad se debieron principalmente a la aplicación de PAM y que al incrementar la dosis se incrementó la cantidad de humedad disponible para la planta. En cuanto al sustrato Vertisol encontramos que no existió incremento en el contenido de humedad con la aplicación de PAM en ninguna de sus dosis, en comparación con el testigo,

por lo que los contenidos de humedad en el suelo no se ven influenciados por la presencia de PAM (cuadro A-12), sino por las características físicas del sustrato, por lo que no es recomendable la aplicación de este material para este caso. Para el sustrato Luvisol (cuadro A-13) los tratamientos con las dosis alta, media y baja fueron estadísticamente similares, pero diferentes del testigo. Sin embargo existen diferencias en los porcentajes de humedad retenida en cada una de las dosis de 36.7% en la alta, 36.24% en la media y 31.25% en la baja, en comparación con el testigo, lo que nos indicó un incremento considerable por la aplicación de la PAM. Si comparamos los porcentajes de incremento en las dosis de aplicación de PAM, veremos que en la dosis media, como arrojan los valores, se obtienen los mismos resultados que con una dosis alta y en la dosis media y la baja se obtienen diferencias del 5% de incremento, ganado por la dosis media. Esto indica que la dosis de aplicación más recomendable para este tipo de sustrato es la dosis media ya que se obtienen los mismos resultados que con la dosis alta y es por lo tanto más económico.

Si comparamos los porcentajes de humedad incrementados en los diferentes tipos de sustratos ensayados podemos concluir que en el sustrato arenoso se obtuvieron los mayores resultados al incrementarse en la dosis alta un 59.34% la humedad, para el Vertisol no hubo incremento en ninguna de sus dosis y para el sustrato Luvisol se presentó un incremento en la dosis alta del 36.7%. Resultados que nos ayudan a comprobar lo reportado por la bibliografía de Lara, (1993) quien comenta que la respuesta de la planta a la aplicación de la PAM será más favorable en la medida que las condiciones del suelo sean adversas para la retención de humedad y que necesariamente exista una deficiencia de agua, característica, que presentan los sustratos arenosos. En este tipo de suelos es donde se obtendrán los mejores resultados en la aplicación de PAM.

## IV CONCLUSIONES

1. La absorción de humedad por el sistema PAM-agua decrece con el tiempo saturándose casi por completo alrededor de los 30 minutos de contacto.
2. En presencia de electrólitos, tales como el HCl, KCl;  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ,  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  y  $\text{H}_2\text{PO}_4$  la absorción de humedad por la PAM disminuyó notablemente con respecto al sistema PAM-agua, a mayor dosis de electrólitos menor absorción de humedad.
3. La saturación completa de los diferentes sistemas PAM-electrólito-agua alcanzó menores tiempos de saturación correspondiente a HCl (del minuto 8 al 15 ), KCl (del 18 al 21 minuto);  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  (del 10 al 20 minuto)y  $\text{H}_2\text{PO}_4$  (del minuto 3 al 12), independientemente de las dosis aplicadas.
4. Con respecto a la cinética de absorción de humedad por la PAM (3 dosis, 4 tipos de sustratos), la pérdida de agua fue decreciente y continúa, independientemente del tipo de sustrato.
5. El mayor incremento en la retención de humedad de los sustratos ocurrió con la mayor dosis de PAM en correspondencia con lo postulado a las hipótesis planteadas.
6. La adición de PAM a los sustratos, en presencia de un cultivo, retrasó el tiempo de marchitamiento de las plantas, lo que indica un aumento en la retención de humedad de agua, en la capacidad de campo y una disminución en la frecuencia de riegos.
7. La utilización de poliacrilamida puede conllevar a un manejo más eficiente del balance hídrico en los procesos agrícolas

## LITERATURA CITADA

1. Aguirre, G. A. (2006). Apuntes de nutrición vegetal, Facultad de Estudios Superiores Cuautitlan,
2. Aguirre, G. A.; Cedillo, M. C.; Delgadillo, G. G.; León, R. F. (1985). Manual de laboratorio Química I, Ingeniería Agrícola, UNAM. Imprenta universitaria, México.
3. Azzam, R. A. I. (1980). Agricultural Polymers: Polyacrilamide preparation, application and prospects in soil conditioning. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 11:767-834.
4. Canizal, J.A. (1993). Evaluación de un hidrogel con diferentes tipos y cualidades de sustratos en cultivo de pepino. Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, México.
5. Domínguez, F. (1986). El riego, su implantación y su técnica. Editorial DOSSAT, S.A. Madrid, España.
6. Ferlitech, S.A. de C.V. Folleto técnico de Aquasorb France. S/Annom
7. Ibarra, J.L. (1991). Acolchado de suelos con películas plásticas, pp 13-15. editorial Limusa, México
8. Lara H., A. y A. Legaspi G. (1990). Evaluación de cuatro dosis de Poliacrílida y tres densidades de siembra en los rendimientos de frijol, pp. 104-118. In: Memorias sobre avances de investigación en la Esc. de Agronomía de la Universidad Autónoma de Zacatecas. U. A. Z.
9. Lara, H. A. (1993). Poliacrílida, zeolita y estiércol como mejoradores de la condición hídrica y la fertilidad del suelo. Tesis de Maestría, Colegio de Postgraduados Chapingo, Montecillo, México.
10. Legaspi, G. A. y A. Lara H. (1990). Uso de Poliacrílida para aumentar la eficiencia de las técnicas de captación del agua de lluvia, pp. 240-248. In: Tovar, J. L. y A. Legaspi G. (eds.) Memoria del primer. Simposium Nacional de captación in situ del agua de lluvia y manejo de escurrimientos a nivel parcela. SMCS. Zacatecas. Zac., México.
11. Manual, (1982). Manual para la educación agropecuaria,). Horticultura, editorial trillas, México.

12. Manual, (1999). Manual para la educación agropecuaria, suelo y agua ó riego y drenaje, editorial Trillas.
13. Martínez, C. F. (1999). Introducción al riego, Universidad Politécnica de Valencia (U.P.V.), España.
14. Orson W. (1979). Principios y aplicaciones del riego, 2ª. Edición, editorial REVERTÉ, S.A. España.
15. Osorio, G. y M. Chávez. (1991). La Poliacrilamida y soluciones salinas en la retención de agua y fuerza de encostramiento del suelo, pp. 29. In: Tovar S., J. L. y R. Quintero L. (eds.) Memoria del XXIV Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo. Pachuca, Hgo., México.
16. Quetzalcoatl, (2003). Quetzalcoatl Sistemas, S.A. de C.V.
17. Robledo, P.F. (1981). Aplicación de los plásticos en la agricultura, pp13-17. ediciones mundi-prensa Madrid, España.
18. Rubio, H. O. M. K. Word; M. Cardenas and Buckanan. (1989). Effect of polyacrylamide on seedling emergence of three grass species. Soil Science 148:355-360.
19. UACH, (1991). Manual de conservación del suelo y del agua, talleres gráficos de la Nación, pp. 125-147, México.
20. Villareal, H. G. (2003). Aprovechamiento de escurrimientos superficiales municipio de Huayacocutla, Veracruz. México, FESC, UNAM.
21. Tamhane, R. (1978). Suelos: Su Química y Fertilidad en Zonas Tropicales., edit. Diana, México. pp. 56-57
22. Wallace, A. (1986). Effect of poliymers in solution culture on growth an mineral composition of tomatoes. Soil Science. 141:5:395-396
23. Wallace, A. (1986) and G.A. Wallace. Effetct of polymeric soil conditioners on emergence of tomato seedlings. Soil Science. 141:5:321-323
24. Watwood, M. (1998). Polyacrylamide as a substrate for microbial amidase in culture and soil. Soil Biol. Biochem. 30:13:1647-1654

25. Watwood, M. (1998). Polyacrylamide as an organic nitrogen source for soil microorganisms with potential effects on inorganic soil nitrogen in agricultural soil. *Soil Biol. Biochem.* 30:13:1045-1052
26. [www.soilmoist.com.mx](http://www.soilmoist.com.mx)

## APÉNDICES

Cuadro A-1 Cantidad de agua absorbida por 1g de PAM.

Tiempo (Min.)	Humedad retenida (ml)
3	43
6	55
9	92
12	74
15	109
18	108
21	124
24	141
27	160
30	168

Cuadro A-2 Pérdidas de agua en 1g de PAM.

Tiempo (días)	Humedad perdida (g)
1	0
2	7
3	14
4	19
5	26.2
6	37
7	46
8	54.6
9	64
10	70
11	76
12	91
13	96.5
14	102.9
15	119.5
16	134.9
17	141.4
18	159.6
19	164.2
20	164.7

Cuadro A-3 Cantidad de absorción de agua por el PAM en presencia de HCl en concentraciones 0.01N, 0.1N y 1N (en 250 ml de solución).

0.01N

Tiempo Min.	Cantidad absorbida (ml)	Cantidad sobrante (ml)
3	16	234
6	30	220
9	30	220
12	36	214
15	40	210
18	46	204
21	50	200
24	54	196
27	56	194
30	58	192

0.1N

Tiempo Min.	Cantidad absorbida (ml)	Cantidad sobrante (ml)
3	10	240
6	10	240
9	12	238
12	12	238
15	14	236
18	14	236
21	14	236
24	14	236
27	14	236
30	14	236

1N

Tiempo Min.	Cantidad absorbida (ml)	Cantidad sobrante (ml)
3	8	242
6	8	242
9	8	242
12	8	242
15	8	242
18	8	242
21	8	242
24	7	243
27	7	243
30	7	243

Cuadro A-4 Cantidad de absorción de agua por la PAM en presencia de KCl en concentraciones 0.01N, 0.1N y 1N. (en 250 ml de solución).

0.01N

Tiempo Min.	Cantidad absorbida (ml)	Cantidad sobrante (ml)
3	22	228
6	24	226
9	40	210
12	52	198
15	54	196
18	60	190
21	68	182
24	76	174
27	78	172
30	80	170

0.1N

Tiempo Min.	Cantidad absorbida (ml)	Cantidad sobrante (ml)
3	14	236
6	20	230
9	21	229
12	26	224
15	27	223
18	32	218
21	32	218
24	34	216
27	36	214
30	36	214

1N

Tiempo Min.	Cantidad absorbida (ml)	Cantidad sobrante (ml)
3	8	242
6	10	240
9	12	238
12	12	238
15	16	234
18	16	234
21	16	234
24	18	232
27	18	232
30	18	232

Cuadro A-5 Punto de saturación de cuatro suelos ( Arena de río, Vertisol, Luvisol y Salino-  
alcalino) con tres dosis de PAM en presencia de un testigo. Utilizando 300g de suelo para  
cada uno.

### **ARENA DE RÍO**

Dosis de PAM (g)	Cantidad absorbida (ml)	Cantidad sobrante (ml)
S/PAM	103	147
1.5	203	47
1.0	192	58
0.5	134	116

### **SUELO VERTISOL**

Dosis de PAM (g)	Cantidad absorbida (ml)	Cantidad sobrante (ml)
S/PAM	173	327
1.5	293	207
1.0	262	238
0.5	220	280

### **SUELO LUVISOL**

Dosis de PAM (g)	Cantidad absorbida (ml)	Cantidad sobrante (ml)
S/PAM	149	101
1.5	229	21
1.0	203	47
0.5	194	56

Continuación Cuadro A-5. Punto de saturación de cuatro suelos

**SUELO VERTISOL**

Dosis de PAM (g)	Cantidad absorbida (ml)	Cantidad sobrante (ml)
S/PAM	148	152
1.5	241	59
1.0	218	82
0.5	187	113

Cuadro A-6 Cantidad de absorción de agua por la PAM en presencia de  $\text{KNO}_3$  en concentraciones (alta, media y baja) en 250 ml de solución.

ALTA

Tiempo Min.	Cantidad absorbida (ml)	Cantidad sobrante (ml)
3	5	245
6	13	237
9	15	235
12	15	235
15	17	233
18	18	232
21	18	232
24	18	232
27	19	231
30	20	230

MEDIA

Tiempo Min.	Cantidad absorbida (ml)	Cantidad sobrante (ml)
3	14	236
6	16	234
9	17	234
12	17	233
15	17	233
18	18	232
21	18	232
24	19	231
27	20	230
30	21	229

BAJA

Tiempo Min.	Cantidad absorbida (ml)	Cantidad sobrante (ml)
3	11	239
6	13	237
9	15	235
12	18	232
15	19	231
18	19	231
21	20	230
24	20	230
27	22	228
30	23	227

Cuadro A-7 Cantidad de absorción de agua por la PAM en presencia de  $H_3PO_4$  en concentraciones (alta, media y baja) en 250 ml de solución.

ALTA

Tiempo Min.	Cantidad absorbida (ml)	Cantidad sobrante (ml)
3	6	244
6	7	243
9	7	243
12	8	242
15	8	242
18	8	242
21	9	241
24	9	241
27	10	240
30	10	240

MEDIA

Tiempo Min.	Cantidad absorbida (ml)	Cantidad sobrante (ml)
3	7	243
6	9	241
9	9	241
12	9	241
15	9	241
18	9	241
21	9	241
24	9	241
27	9	241
30	9	241

BAJA

Tiempo Min.	Cantidad absorbida (ml)	Cantidad sobrante (ml)
3	8	242
6	8	242
9	8	242
12	8	242
15	10	240
18	10	240
21	10	240
24	12	238
27	12	238
30	12	238

Cuadro A-8 Cantidad de absorción de agua por la PAM en presencia de  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  en concentraciones (alta, media y baja) en 250 ml de solución.

ALTA

Tiempo Min.	Cantidad absorbida (ml)	Cantidad sobrante (ml)
3	11	239
6	14	236
9	14	236
12	15	235
15	15	235
18	16	234
21	16	234
24	17	233
27	17	233
30	17	233

MEDIA

Tiempo Min.	Cantidad absorbida (ml)	Cantidad sobrante (ml)
3	10	240
6	13	237
9	16	234
12	16	234
15	16	234
18	16	234
21	17	231
24	18	231
27	19	231
30	20	230

BAJA

Tiempo Min.	Cantidad absorbida (ml)	Cantidad sobrante (ml)
3	9	241
6	12	238
9	15	235
12	19	231
15	19	231
18	20	230
21	20	230
24	20	230
27	22	227
30	23	227

Cuadro A-9 Cinética de liberación de humedad con tres dosis de la PAM, en cuatro suelos:

**ARENA DE RÍO**

Número de muestreo/día	Perdidas por día del testigo (g.)	Perdidas por día de la dosis Alta en (g.)	Perdidas por día de la dosis Media (g.)	Perdidas por día de la dosis Baja (g.)
1	0	8	0	0
2	4.3	15	7	7
3	10.5	22.2	13.6	12.7
4	16.6	29.4	19.9	18.8
5	23.5	37.8	26.2	24.8
6	30.3	43.3	34	32
7	37.1	51	41.1	37.3
8	43	60.7	46.7	43.5
9	50.2	67.5	54.1	49.8
10	56.9	77.2	59.6	54.2
11	62	86.8	68	61
12	69.5	96.7	76.3	67.8
13	76.9	103.1	86.3	76.1
14	82.4	109.8	93.5	81.9
15	86.9	115.3	100.6	87.9
16	88.5	118.5	106.2	92.1
17	90.5	122.7	108.7	93.9
18	92.3	126.8	112.4	97.1
19	93.8	129	116	100.2
20	95.3	131	117.8	101.8
21	96	133	119.4	103.2
22	96.4	134.7	121.3	104.7
23	96.6	136.4	122.8	105.9
24	96.9	138.1	124.2	107.1
25	99.9	139.8	125.5	108
26	99.9	141.3	126.8	108.8
27	99.9	142.6	128.0	109.5
28	99.9	144.1	129.1	110.2
29	0	145.4	129.9	110.5
30	0	146.6	130.9	111.5
31	0	148.3	131.5	111.9
32	0	149.9	132.4	112.5
33	0	151.5	133.3	113.0
34	0	152.2	133.8	0
35	0	152.7	133.9	0
36	0	152.9	133.9	0
37	0	153.0	0	0
38	0	153.3	0	0
39	0	153.3	0	0
40				

Continuación Cuadro A-9 Cinética de liberación.....

**SUELO VERTISOL**

Número de muestreo/día	Perdidas por día del testigo (g.)	Perdidas por día de la dosis Alta en (g.)	Perdidas por día de la dosis Media (g.)	Perdidas por día de la dosis Baja (g.)
1	0	0	0	0
2	6.2	9.7	7.5	8.4
3	12	18.4	15.8	14.6
4	18.3	27.4	24.3	20.5
5	24.5	36.4	32.8	26.3
6	31.6	46.7	41.5	33.5
7	36.4	54.6	50.1	38.7
8	42.9	63.2	56.9	45.8
9	49	72	64.9	86.9
10	53.5	78	71.3	57.6
11	60.4	87.2	80.4	65.8
12	67.3	96.3	89.5	74.0
13	74.7	105.8	98.7	82.7
14	79.7	112.3	105.0	89.4
15	85.7	119.5	111.8	96.8
16	91.7	125.7	117.1	102.8
17	93.9	129.7	120.3	106.8
18	97.6	134.7	124.3	111.3
19	101.2	139.6	129.2	115.8
20	103.2	142.2	131.8	118.4
21	104.6	144.9	134.0	120.8
22	106.0	147.6	136.5	123.1
23	106.9	150.0	138.3	124.8
24	107.7	152.2	140.3	126.4
25	108.5	154.2	141.8	127.7
26	109.3	156.7	143.2	128.9
27	109.7	158.6	144.7	129.8
28	110.1	160.3	145.8	130.7
29	110.4	162.2	146.5	131.3
30	110.8	163.6	148.8	132.2
31	111.2	164.9	149.9	132.6
32	111.9	166.7	151.1	133.4
33	112.6	168.4	160.3	134.2
34	113.3	169.9	162.5	135.2
35	113.4	170.8	162.9	135.6
36	113.5	171.5	163.3	135.8
37	113.5	171.9	163.7	135.8
38	0	172.3	163.9	136.0
39	0	173.2	164.5	136.0
40	0	173.4	0	0

Continuación Cuadro A-9 Cinética de liberación.....

**SUELO LUVISOL**

Número de muestreo/día	Perdidas por día del testigo (g.)	Perdidas por día de la dosis Alta en (g.)	Perdidas por día de la dosis Media (g.)	Perdidas por día de la dosis Baja (g.)
1	0	0	0	0
2	6.3	11	6.5	8.5
3	12.6	21	13.2	16.3
4	18.5	31.3	19.1	24.1
5	24.4	41.5	25.0	31.8
6	31.6	51.3	32.5	40.8
7	36.6	59	37.7	47.0
8	43.3	68.1	44.4	54.8
9	50.0	76.1	51.4	62.1
10	54.6	81.9	55.9	66.8
11	61	88.2	63.0	73.4
12	67.4	94.5	70.0	79.9
13	73.2	100.2	76.5	85.9
14	77.4	103.8	82.6	91.2
15	82.2	108.3	86.0	94.2
16	85.9	111.9	90.5	97.6
17	88.9	113.9	93.0	99.8
18	92	117.0	96.9	102.0
19	95.1	120.1	100.8	106.0
20	96.8	121.6	102.9	107.8
21	98.4	123.0	104.7	109.3
22	99.8	124.5	106.7	110.8
23	101.1	125.8	108.5	112.2
24	102.3	126.9	110.2	113.6
25	103.3	127.8	111.6	114.6
26	104.2	128.7	112.9	115.5
27	105.0	129.3	114.5	116.2
28	105.6	129.9	115.5	116.6
29	106.2	130.3	116.7	117.0
30	107.1	131.3	117.8	117.8
31	107.4	131.3	119.0	118.3
32	108.2	132.3	120.2	119.2
33	109.0	133.3	121.4	120.0
34	110.1	134.3	122.6	121.3
35	110.2	134.4	123.2	121.6
36	110.6	134.6	123.7	121.9
37	0	134.7	124.0	121.9
38	0	134.8	124.3	122.0
39	0	135.4	125.0	0
40	0	134.5	125.0	0

Continuación Cuadro A-9 Cinética de liberación.....

**SALINO-ALCALINO**

Número de muestreo/día	Perdidas por día del testigo (g.)	Perdidas por día de la dosis Alta en (g.)	Perdidas por día de la dosis Media (g.)	Perdidas por día de la dosis Baja (g.)
1	0	0	0	0
2	6.6	8.9	5.7	6.0
3	12.3	16.8	12.3	12.8
4	18.2	24.3	18.6	19.1
5	24.0	31.8	24.9	25.4
6	31.7	40.4	32.3	32.3
7	36.8	47.2	37.4	37.2
8	44.0	54.5	43.8	43.9
9	50.3	61.0	49.9	50.4
10	55.4	66.1	54	55.1
11	62.6	74.0	60.6	62.1
12	69.7	81.8	67.1	69.1
13	77.2	90.2	75.1	76.4
14	81.3	95.5	80.6	81.7
15	86.8	101.1	87.1	86.9
16	91.0	105.9	92.0	91.2
17	93.7	109.2	94.4	93.5
18	86.8	112.8	98.4	97.3
19	91.0	116.3	102.3	101.1
20	93.7	118.6	103.8	101.1
21	96.4	120.2	105.5	102.6
22	99.0	122.4	107.4	104.1
23	100.5	123.8	109.0	105.4
24	102.0	125.6	110.6	106.7
25	103.3	128.4	112.6	109.1
26	104.3	128.4	113.3	109.1
27	105.8	129.4	113.5	109.9
28	107.2	130.5	114.5	110.8
29	107.2	131.6	115.0	111.5
30	107.9	132.6	116.	112.3
31	108.4	133.7	117.5	112.9
32	108.6	134.8	118.8	114.0
33	109.5	135.9	120.1	155.0
34	109.9	137.3	121.6	116.4
35	110.6	137.7	122.1	116.7
36	111.3	138.3	122.6	117.1
37	112.4	138.3	123.0	117.1
38	112.4	138.6	124.2	117.1
39	0	139.2	124.3	117.3
40	0	139.2	124.3	118.0

Cuadro A-10 Datos de % de humedad con dosis de PAM (alta, media, baja y testigo) en tres tipos de suelos con presencia de planta de brócoli bajo condiciones de invernadero.

**BLOQUE I**

	M <sub>1</sub> peso (g)	M <sub>2</sub> peso (g)	M <sub>3</sub> peso (g)	M <sub>4</sub> peso (g)	M <sub>5</sub> peso (g)	M <sub>6</sub> peso (g)	M <sub>7</sub> peso (g)
<b>Arena</b>	21.98	22.72	12.85	7.0	4.0	-	-
Testigo	33.0	30.24	44.65	15	20	24	4.0
Alta	28.89	23.58	32.28	15	8.0	5.0	1.0
Media	18.75	13.61	14.53	4.0	3.0	-	-
Baja							
<b>Vertisol</b>							
Testigo	53.33	39.53	73.91	19	16	-	-
Alta	41.01	38.53	31.55	31	12	-	-
Media	43.60	27.17	21.84	19	14	-	-
Baja	43.83	28.08	26.11	20	13	-	-
<b>Luisol</b>							
Testigo	37.82	30.92	23.43	13	5.0	-	-
Alta	73.59	56.96	73.98	46	32	24	18
Media	69.62	46.42	41.89	38	25	24	15
Baja	42.69	38.92	38.53	22	16	-	-

**BLOQUE II**

	M <sub>1</sub> peso (g)	M <sub>2</sub> peso (g)	M <sub>3</sub> peso (g)	M <sub>4</sub> peso (g)	M <sub>5</sub> peso (g)	M <sub>6</sub> peso (g)	M <sub>7</sub> peso (g)
<b>Arena</b>	15.75	9.74	7.31	3.0	5.0		
Testigo	42.35	32.95	38.5	19.0	34.0	12.0	5.0
Alta	45.50	21.21	17.94	15.0	6.0	5.0	34.0
Media	21.23	16.16	13.47	10.0	2.0	-	-
Baja							
<b>Vertisol</b>							
Testigo	58.29	51.51	35.38	22.0	18.0	-	-
Alta	51.40	32.71	22.07	15.0	16.0	-	-
Media	53.19	29.93	22.44	16.0	14.0	-	-
Baja	49.03	36.04	21.35	14.0	14.0	-	-
<b>Luisol</b>							
Testigo	41.59	36.56	28.23	23.0	16.0	-	-
Alta	51.06	46.37	40.90	44.0	28.0	29.0	21.0
Media	60.84	47.57	40.71	31.0	27.0	24.0	16.0
Baja	57.97	11.33	45.40	34.0	25.0	21.0	13.0

### BLOQUE III

	M <sub>1</sub> peso (g)	M <sub>2</sub> peso (g)	M <sub>3</sub> peso (g)	M <sub>4</sub> peso (g)	M <sub>5</sub> peso (g)	M <sub>6</sub> peso (g)	M <sub>7</sub> peso (g)
<b>Arena</b>	17.41	14.41	7.30	5.0	2.0	-	-
Testigo	32.80	28.08	36.36	55.0	24.0	6.0	15.0
Alta	27.09	39.10	100.0	31.0	11.0	6.0	2.0
Media	25.0	21.56	16.54	21.0	4.0	-	-
Baja							
<b>Vertisol</b>							
Testigo	60.50	47.50	33.85	18.0	21.0	-	-
Alta	51.35	44.09	26.66	19.0	21.0	-	-
Media	58.26	49.32	30.29	20.0	22.0	-	-
Baja	20.0	45.33	31.30	21.0	19.0	-	-
<b>Luvisol</b>							
Testigo	47.42	36.61	29.23	22.0	17.0	-	-
Alta	60.81	47.12	46.0	35.0	33.0	26.0	14.0
Media	57.47	46.91	41.44	30.5	23.0	17.0	11.0
Baja	57.80	47.50	40.18	28.0	19.0	-	-

### BLOQUE IV

	M <sub>1</sub> peso (g)	M <sub>2</sub> peso (g)	M <sub>3</sub> peso (g)	M <sub>4</sub> peso (g)	M <sub>5</sub> peso (g)	M <sub>6</sub> peso (g)	M <sub>7</sub> peso (g)
<b>Arena</b>	19.50	13.10	7.69	2.0	2.0	-	-
Testigo	49.6	54.54	31.77	22.0	41.0	5.0	2.0
Alta	35.18	42.78	63.63	13.0	5.0	4.0	1.0
Media	32.51	16.43	18.0	4.0	2.0	-	-
Baja							
<b>Vertisol</b>							
Testigo	62.02	45.36	30.18	24.0	17.0	-	-
Alta	57.63	46.0	32.66	20.0	17.0	-	-
Media	49.78	31.31	22.48	18.0	13.0	-	-
Baja	57.55	41.0	23.07	19.0	16.0	-	-
<b>Luvisol</b>							
Testigo	42.59	34.24	24.39	19.0	13.0	-	-
Alta	44.07	55.67	32.81	35.0	22.0	19.0	12.0
Media	60.84	53.12	38.42	34.0	60.0	19.0	10.0
Baja	53.84	48.79	35.74	36.0	18.0	-	-

## BLOQUE V

	M <sub>1</sub> peso (g)	M <sub>2</sub> peso (g)	M <sub>3</sub> peso (g)	M <sub>4</sub> peso (g)	M <sub>5</sub> peso (g)	M <sub>6</sub> peso (g)	M <sub>7</sub> peso (g)
<b>Arena</b>	16.71	11.82	7.33	3.0	1.0	-	-
Testigo	22.77	42.05	30.14	13.0	22.0	6.0	-
Alta	26.66	43.65	27.24	12.0	4.0	3.0	-
Media	27.33	18.62	10.72	6.0	2.0	-	-
Baja							
<b>Vertisol</b>							
Testigo	55.76	40.37	25.45	16.0	10.0	-	-
Alta	39.09	27.80	18.27	16.0	16.0	-	-
Media	78.98	62.50	45.19	33.0	31.0	85	12
Baja	51.74	38.62	22.0	21.0	7.0	-	-
<b>Luvisol</b>							
Testigo	-	-	-	-	-	-	-
Alta	50.25	55.81	48.57	35.0	24.0	22.0	10.0
Media	60.77	50.51	39.69	36.0	24.0	-	-
Baja	54.41	47.97	34.87	26.0	19.0	-	-

Cuadro A-11 Datos promedio del número de hojas en las plantas de brócoli bajo condiciones de invernadero.

Tratamiento	# de hojas por planta
Vertisol medio	6.4
Vertisol alto	6.2
<b>Vertisol Tes.</b>	6.0
Arena media	6.0
Vertisol bajo	5.8
Arena baja	5.6
Arena alta	5.4
Luvisol alto	4.6
Luvisol medio	4.4
<b>Arena Tes.</b>	4.2
Luvisol bajo	3.2
<b>Luvisol Tes.</b>	3.2

Cuadro A-12 Datos promedio de la altura de las plantas de brócoli bajo condiciones de invernadero.

Tratamiento	Altura de las plantas (Cm.)
Arena alta	15.6
Arena media	15.0
Vertisol media	14.6
Vertisol alta	14.4
Arena baja	13.0
Vertisol baja	12.4
<b>Vertisol Tes.</b>	12.0
<b>Arena Tes.</b>	9.60
Luvisol medio	7.60
Luvisol alto	6.80
Luvisol bajo	6.00
<b>Luvisol Tes.</b>	5.80