

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN QUÍMICA APLICADA



HIDROGELES MEJORADORES DE CULTIVOS AGRÍCOLAS

CASO DE ESTUDIO

PRESENTADO COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE:

ESPECIALIZACIÓN EN QUÍMICA APLICADA

OPCION TERMINAL EN AGROPLASTICULTURA

PRESENTA:

OBDULIA GONZALEZ HERNANDEZ



CENTRO DE INFORMACIÓN

Saltillo, Coahuila, México

26 OCT 2007

Agosto 2007

RECIBIDO

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN QUÍMICA APLICADA



HACE CONSTAR QUE EL CASO DE ESTUDIO TITULADO:

HIDROGELES MEJORADORES DE CULTIVOS AGRÍCOLAS.

PRESENTADO POR:

OBDULIA GONZALEZ HERNANDEZ

REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE:

ESPECIALIZACIÓN EN QUÍMICA APLICADA

OPCION TERMINAL EN AGROPLASTICULTURA

HA SIDO DIRIGIDO POR:



DRA. HORTENSIA ORTEGA ORTIZ

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN QUÍMICA APLICADA



A TRAVES DEL JURADO EXAMINADOR HACE CONSTAR QUE EL CASO DE ESTUDIO

HIDROGELES MEJORADORES DE CULTIVOS AGRÍCOLAS.

QUE PRESENTA:

OBDULIA GONZALEZ HERNANDEZ

**HA SIDO ACEPTADO COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:**

ESPECIALIZACIÓN EN QUÍMICA APLICADA

OPCION TERMINAL EN AGROPLASTICULTURA

PRESIDENTE
M. C. Juanita Flores Velásquez

VOCAL
M. C. Antonio Ledezma Pérez

Saltillo, Coahuila, México

Agosto 2007

AGRADECIMIENTOS

Al CONACYT por brindarme el apoyo económico durante mis estudios de la Especialidad en Química Aplicada con opción terminal en Plásticos en la Agricultura.

Agradezco al Centro de Investigación en Química Aplicada por abrirme sus puertas y darme la oportunidad de entrar en el bello y maravilloso mundo del saber y brindarme sus servicios durante mi estancia.

A la Dra. Hortensia Ortega Ortiz por darme la oportunidad de realizar este trabajo, y lo más importante por la confianza y el apoyo que me brindo durante el trabajo realizado gracias por la paciencia que me tuvo y esa amabilidad de enseñarme a hacer las cosas por esto y más mil gracias.

A la M. C. Juanita Flores Velásquez, por haber participado en la revisión de este trabajo y gracias por la amistad que me brindo durante toda la especialización.

Al M. C. Antonio Ledezma Pérez, gracias por su participación en la revisión de este trabajo y por todas las observaciones que me hizo.

A todos los que forman parte del departamento de Agroplásticos que ayudaron en mi formación con la transmisión de sus conocimientos.

A mis compañeros de la especialización 2006-2007 por todos los momentos de alegrías que pasamos y por su amistad que me brindaron. Gracias.

DEDICATORIAS

Agradezco a **DIOS** por haberme permitido realizar mis sueños de terminar la especialidad con gran satisfacción, porque sé que existes y siempre estás junto a mí, porque cuanto soy, cuanto puedo y cuanto recibo es regalo tuyo

A MIS PADRES: Juan González Conrado y Domitila Hernández Hernández agradezco por que nuevamente me brindaron todo el apoyo que necesité en esta especialidad y por haber confiado en mí, en seguir adelante, doy gracias también por tener la suerte de poder decirles que son las personas mas maravillosas que existen para mi, gracias por sus abrazos, ánimos y palabras de consuelo. Los quiero mucho.

A MIS HERMANOS: Rosa Maria, Josefina, Sebastián, Carlos, Rubisel, Gregorio y Juan. Con cariño para cada uno de ustedes, que forman parte en mi formación profesional, el vínculo que une nuestra familia no es la sangre, sino el respeto y goce mutuo. Los quiero mucho. En especial a mi hermana Mary por apoyarme siempre, te agradezco todo lo que has hecho por mi, gracias te quiero mucho hermanita.

A MIS CUÑADOS (A): Aurora, Tere, Soledad y Manuel. Gracias por sus consejos de seguir adelante, y sobre todo por darme la oportunidad de compartir con ustedes los momentos felices y gracias por preocuparse por mí y saber comprenderme cuando necesito de ustedes.

A MIS SOBRINOS: Germán, Griselda, Rubisel, Esmeralda, Ana Laura, Adriana Mayte Naydelin, Juanito, José Manuel, Juan de Jesús, Madaleine y Deysi Belén. Gracias por darme esas alegrías y sonrisas que dicen más que mil palabras y que me inducen a seguir adelante.

A MI ESPOSO, por el apoyo que siempre me brindo durante la especialidad y la paciencia que me tuviste durante todo este tiempo eres una persona maravillosa, nunca cambies te quiero mucho de igual manera te doy las gracias por ayudarme en este trabajo, gracias por tus consejos y experiencias, por acompañarme en todas las situaciones en las que soy débil y tú me das la fortaleza por todos esos momentos Gracias.

INDICE GENERAL

<i>Agradecimientos</i>	<i>i</i>
<i>Dedicatorias</i>	<i>ii</i>
<i>Índice general</i>	<i>iii</i>
<i>Índice de figuras</i>	<i>v</i>
INTRODUCCIÓN	1
REVISION DE LITERATURA	3
Hidrogeles	3
Cambios Estructurales y Físicos de los Hidrogeles	4
Sensibilidad al pH	4
Sensibilidad a la Temperatura	5
Sensibilidad a la Ionización por Iluminación con Luz Ultravioleta.	5
Sensibilidad al Calentamiento Local por Iluminación con Luz Visible.	5
Transición de Fase de Volumen en Hidrogeles	5
	6
Principales Interacciones Moleculares en los Geles	
Fuerzas de Van Der Waals	7
Interacción Hidrófoba	7
Enlace de Hidrógeno	8
Interacción Electroestática	8
Propiedades Importantes de los Hidrogeles Para Aplicaciones Agrícolas	8
Contenido de Agua en el Equilibrio	9
Estabilidad Dimensional	11
Permeabilidad al Oxígeno	11
Formulaciones de Hidrogeles Utilizados en la Agricultura	13
Toxicidad en los Hidrogeles	14
Forma de Aplicación de los Hidrogeles	14
Dosificación Recomendada del Hidrogel	15
Cultivos a los que se les Puede Aplicar Hidrogeles	16
	17
Ventajas del Uso de los Hidrogeles en la Agricultura	
Retención del Agua en el Suelo por la Acción de los Hidrogeles	18
Disminución de la Lixiviación Nutritiva	20
Aprovechamiento de los Nutrientes	22
Mejora en la Disponibilidad del Agua a las Plantas	22
Ventajas en el Riego con el Uso de los Hidrogeles	24
Uso Eficiente de Fertilizantes	25
Aumento en la Capacidad de Intercambio Catiónico	26

Efectos del Hidrogel	27
Efectos del Hidrogel sobre la Transpiración de la Planta.	28
Efectos de la Presencia de Micorrizas al Incorporar Hidrogel en las Plantas	29
Efectos en la Germinación de la Semilla	29
Efectos de los Hidrogeles en el Semillero, Trasplante y Establecimiento de las Plantas.	32
Habilidad del Hidrogel para Modificar las Características del Suelo	34
Cambios al Suelo y a la Matriz de los Medios	35
Acción del Hidrogel en la Fertilización y en las Sales del Suelo	36
Permanencia en el Suelo	38
Respuesta Biológica en la Matriz del Suelo Incorporando Hidrogeles	39
Respuesta Bacteriana en el Suelo con la Aplicación de Hidrogeles	39
Rendimiento del Hidrogel a Nivel Productividad	40
ESTADO ACTUAL DEL CONOCIMIENTO	42
ÁREAS DE OPORTUNIDAD	45
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	47
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	48

INDICE DE FIGURAS

		Páginas
Figura 1	Estado colapsado e hinchado de un hidrogel.	6
Figura 2	Representación esquemática de las cuatro interacciones responsables del comportamiento de la transición de fase en geles.	7
Figura 3	Proceso de hinchamiento a partir del estado seco y parcialmente hinchado.	9
Figura 4	Representación de la retención de agua en el suelo usando hidrogeles.	18
Figura 5	Disminución de la lixiviación nutritiva con el uso de hidrogeles.	20
Figura 6	Almacenamiento de agua en las raíces con y sin hidrogel.	24
Figura 7	Ventajas en el riego con el uso de hidrogeles.	25
Figura 8	Semillas de tomate germinadas para distintas proporciones de hidrogel.	31
Figura 9	Numero de semillas germinadas con respecto a la cantidad de hidrogel.	31
Figura 10	Numero de semillas germinadas al usar hidrogel.	32

INTRODUCCIÓN

Los hidrogeles se pueden definir como materiales poliméricos entrecruzados en forma de red tridimensional de origen natural o sintético, que se hinchan en contacto con el agua formando materiales blandos y elásticos, y que retienen una fracción significativa del agua en su estructura sin disolverse. El mecanismo por el cual 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 hidrogeles son la energía libre de mezcla y la respuesta elástica del entrecruzamiento (Carhuapoma y Santiago, 2005).

Entre las características más importantes de los hidrogeles se encuentran su capacidad de absorción y retención de agua, que depende de la naturaleza de los monómeros empleados en su síntesis y del grado de entrecruzamiento de la red macromolecular.

Una aplicación que está cobrando interés en la actualidad es el empleo de estos polímeros en el campo de la agricultura, para aumentar la capacidad de retención de agua del suelo, favoreciendo por tanto el desarrollo de las plantas. Al mezclar el hidrogel con el suelo se logra, por un lado, aprovechar mejor el agua de lluvia o riego al perderse menor cantidad de agua por filtración, y por otro lado, también se consigue disminuir la evaporación de la misma. Estos factores son suficientes para mejorar la actividad biológica y aumentar la producción del suelo.

Además, la utilización de polímeros también produce una mejora de la estructura del suelo y de la aireación del mismo. Así, el uso de este tipo de polímeros permite, por ejemplo, la recuperación de zonas semiáridas o terrenos de cultivos abandonados y poco fértiles cuando se emplea de forma extensiva. El estudio de materiales con propiedades especiales que permitan el aprovechamiento de estos suelos, ha encontrado en los hidrogeles una posible solución, siendo utilizados en terrenos desérticos para mantener la humedad, y en regiones montañosas, en las que las lluvias arrastran las sustancias necesarias para el desarrollo de cultivos, para la liberación controlada de sales orgánicas y abonos nitrogenados.

El empleo de hidrogeles superabsorbentes en aplicaciones agrícolas demanda el que tengan unos requerimientos mínimos, ya que no se puede utilizar al azar cualquier tipo de hidrogel sino que es necesario estudiar previamente su comportamiento antes de su empleo. El mal uso de los hidrogeles puede provocar grandes pérdidas económicas.

En los últimos años la demanda de hidrogeles ha aumentado considerablemente en el área de cultivo y reforestación. De la misma manera, mezclado o esparcido en perforaciones en la tierra, el hidrogel conserva los nutrientes del agua, permitiendo espaciar el regado y conservar en buen estado las plantas sin tener que regarlas constantemente; retiene, además, la humedad alrededor de las semillas, mejorando y acelerando la germinación.

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Hidrogeles

Los hidrogeles se caracterizan por su capacidad hidrofílica e insolubilidad en agua, alta retención de agua, permeabilidad hacia una gran variedad de moléculas, incluyendo macromoléculas, y por su buena biocompatibilidad. La hidrofílicidad se debe a la presencia de grupos solubles en agua tales como -OH, -COOH, -CONH-, -SOH, entre otros. La insolubilidad y la estabilidad de la forma del hidrogel se deben a la presencia de la red tridimensional. El alto contenido de agua en el hidrogel puede contribuir con su compatibilidad con los tejidos naturales (Klempner, 1990).

Los hidrogeles pueden clasificarse de varias formas, dependiendo de las características y propiedades que se tomen como referencia. Con base a la naturaleza de los grupos laterales, pueden clasificarse en neutros o iónicos (aniónicos, catiónicos, anfólicos). De acuerdo a sus características mecánicas y estructurales, se pueden clasificar en redes afines o redes fantasmas. Dependiendo del método de preparación, en red homopolimérica, copolimérica, o red polimérica interpenetrada. Finalmente, pueden clasificarse con base en la estructura física de la red en hidrogeles amorfos, semicristalinos, estructuras por enlaces de hidrogeno y agregados hidrocoloidales (Hickey y Peppas, 1995).

Cambios Estructurales Físicos y Químicos

Los hidrogeles basados en polímeros presentan un potencial muy prometedor como materiales inteligentes, ya que muestran cambios estructurales y físicos ante ciertas condiciones externas, entre las que se incluyen, temperatura, pH, campo eléctrico, iones o ciertas especies químicas, fuerza iónica, componentes del solvente, radiación electromagnética y/o estímulo fotoeléctrico, entre otros. Las dos primeras condiciones externas son las que han tenido mayor relevancia en su estudio debido a la importancia de ambas variables en sistemas fisiológicos, biológicos y químicos.

Enseguida se detalla la sensibilidad de los hidrogeles ante cada uno de estos factores externos: (Billmeyer, 1962).

Sensibilidad al pH

El cambio del pH del medio de hinchamiento induce cambios en el grado de ionización correspondiente a los grupos funcionales libres en la cadena polimérica y, por lo tanto un cambio en la capacidad de hinchamiento del hidrogel. Si un gel contiene grupo ionizables, es considerado un gel sensible al pH ya que la ionización se encuentra determinada por el pH, como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Grupos funcionales más comunes en los hidrogeles sensibles al pH.

Ionización	Grupos funcionales			
Aniónicos	-COO ⁻	-OPO ³⁻	-NR ₂ H ⁺	-NR ³⁺
Catiónicos	-NH ³⁺	-NRH ²⁺		

Las redes poliméricas con estos grupos ionizables experimentan cambios importantes en su comportamiento de hinchamiento a diferentes pHs.

Los geles que contienen grupos funcionales como ácidos carboxílicos aumentan su ionización al aumentar el pH, con lo cual se incrementa el número de cargas en la red polimérica, provocando de esta manera un incremento de las repulsiones electrostáticas entre las cadenas. Esto produce un aumento en la hidrofilia de la red y de esta manera un mayor hinchamiento del material.

En cambio, los geles que contienen grupos funcionales como aminas incrementan su ionización con la disminución del pH del medio de hinchamiento lo que provoca un incremento en su capacidad de hinchamiento, atribuida a las repulsiones electrostáticas (Sáez y Sanz, 2003).

Sensibilidad a la Temperatura

Los hidrogeles que contienen N-isopropilacrilamida (NIPA) son geles termosensibles que sufren cambios de volumen con la temperatura. Los cambios de hinchamiento en estos geles son atribuidos al cambio en el balance entre los diferentes tipos de interacciones que existen dentro de la red polimérica, especialmente los puentes de hidrógeno e interacciones hidrófobas (Hirokawa y Tanaka, 1984).

Sensibilidad a la Ionización por Iluminación con Luz Ultravioleta

Existen geles que en ausencia de la radiación ultravioleta sufren un cambio de volumen continuo, mientras que en presencia de radiación ultravioleta muestran una transición en fase de volumen. A una temperatura determinada los geles se hinchan discontinuamente en respuesta a la exposición a radiación ultravioleta y se colapsan cuando dejan de ser irradiados, este efecto se observó en geles con copolímeros de N-isopropilacrilamida (NIPA) y moléculas fotosensibles (Sáez y Sanz, 2003).

Sensibilidad al Calentamiento Local por Iluminación con Luz Visible

Este efecto se manifiesta mediante un incremento de la temperatura dentro de un gel termosensible. En un estudio realizado con un gel de NIPA y el cromóforo clorofila se encontró que, en ausencia de luz, el gel cambiaba de volumen de forma continua al variar la temperatura, mientras que en presencia de iluminación la temperatura de transición disminuye y a un determinado umbral de irradiación la transición de fase de volumen se hace discontinua. En este caso, se propone que la transición de fase es inducida por un calentamiento local de las cadenas del polímero, debido a la absorción y a la consiguiente disipación térmica de la energía luminosa del cromóforo (Sáez y Sanz, 2003).

Transición de Fase de Volumen en Hidrogeles

El estudio de las transiciones de fase en volumen se inició mediante una predicción teórica donde se sugirió la posibilidad de un cambio de volumen discontinuo en el gel, basándose en la analogía de la transición ovillo-glóbulo de polímeros en solución (Dusek y Patterson, 1968).

Un hidrogel puede cambiar su estado drásticamente, de manera similar como un gas cambia su volumen, la Figura 1 muestra esquemáticamente los dos posibles estados de un hidrogel, el colapsado y el hinchado, los cuales corresponden a los estados líquido y gaseoso de los fluidos, respectivamente.

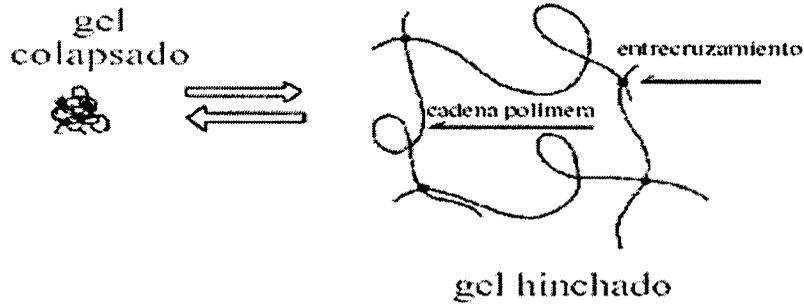


Figura 1. Estados colapsado e hinchado de un hidrogel.

Principales Interacciones Moleculares en los Geles

El estado de hinchamiento es el resultado del balance entre las fuerzas cohesivas y dispersivas intermoleculares que actúan en las cadenas hidratadas. Las fuerzas cohesivas son principalmente debidas a entrecruzamientos covalentes, dando lugar a la formación de hidrogeles químicos, por otra parte pueden ser atribuidos a fuerzas electrostáticas, hidrofóbicas o fuerzas dipolo-dipolo, correspondientes a hidrogeles físicos. Las fuerzas dispersivas se atribuyen, en parte, a una repulsión entre los iones fijos de la red, provocándole hinchamiento del material. La forma no hidratada se denomina xerogel (Choi y Kunioka, 1995).

En general, existen cinco interacciones moleculares fundamentales que hacen posible la transición de fase: fuerzas de Van Der Waals, interacciones hidrófobas, electrostáticas, enlaces de hidrógeno y transferencias de carga. En el caso de los geles se han estudiado más intensamente las primeras cuatro interacciones, las cuales se muestran en la Figura 2. Estas interacciones determinan el comportamiento de fases, la configuración y la reactividad química de las moléculas (Sáez y Sanz, 2003).

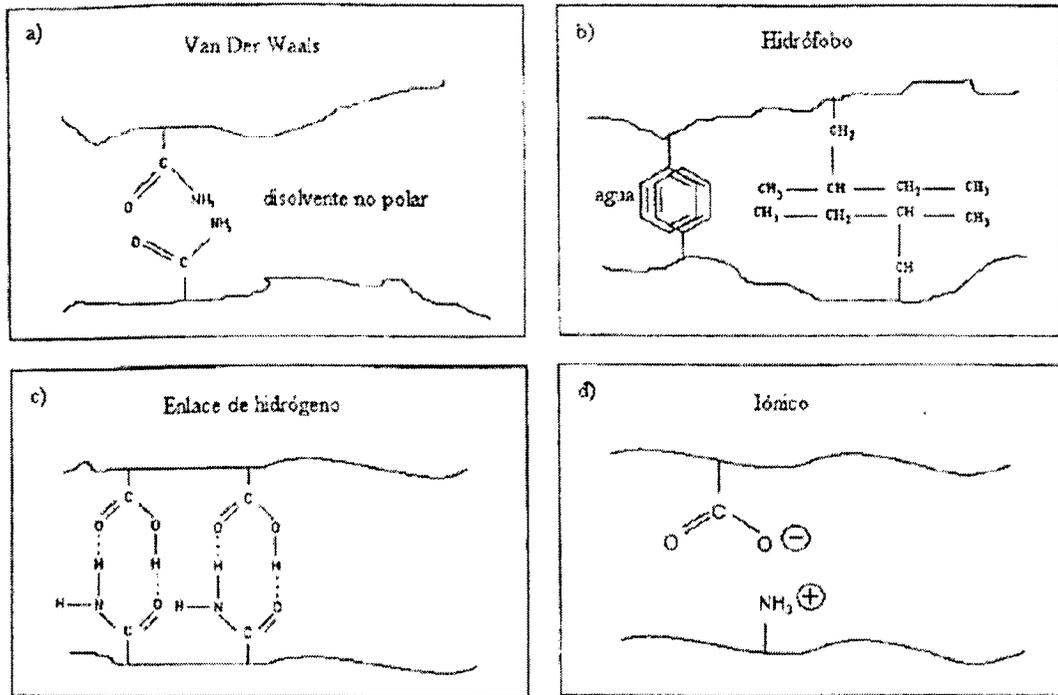


Figura 2. Representación esquemática de las cuatro interacciones responsables del comportamiento de la transición de fase en geles.

Enseguida se describe brevemente la acción de cada una de estas interacciones en los estudios de las cinéticas de hinchamiento en hidrogeles:

Fuerzas de Van Der Waals

En un gel de acrilamida parcialmente ionizado en mezclas de agua/acetona, la principal afinidad polímero-polímero es debida a este tipo de interacción. La acetona se agrega al agua para incrementar las interacciones atractivas entre los polímeros. A temperatura alta el gel se comprime y a temperaturas bajas se deshincha (Figura 2a) (Tanaka, *et al.*, 1980).

Interacción Hidrófoba

Las moléculas de agua vecinas a las cadenas hidrófobas de polímero tienen muchos enlaces de hidrógeno y forman unas estructuras ordenadas llamadas icebergs, las cuales son similares a la estructura de las moléculas de agua en el hielo. Después de la formación del iceberg, disminuyen tanto la entalpía como la entropía de la mezcla, siendo este proceso exotérmico (Sáez y Sanz, 2003). Aunque la energía de la interacción hidrófoba es muy pequeña juega un papel muy importante en la estabilización de la configuración de los

biopolímeros. En los polímeros sintéticos estas interacciones se pueden controlar sustituyendo el grupo lateral de la cadena polimérica que forma la red, (Figura 2b).

Enlace de Hidrógeno

Este tipo de interacción se presenta cuando existe un átomo de hidrógeno localizado entre dos átomos próximos con alta electronegatividad, entre los que se encuentran oxígeno y nitrógeno. Los efectos de este tipo de interacción en los estudios de transición de fase fueron demostrados en una red interpenetrada basada en poli (ácido acrílico) y (poliacrilamida), donde se encontró que el hidrogel se comprimía a bajas temperaturas mientras que su volumen se incrementaba a medida que lo hacía la temperatura, este efecto ha sido explicado mediante la formación y disociación de puentes de hidrógeno a bajas y altas temperaturas respectivamente. La disociación de puentes de hidrógeno formado entre ambas cadenas poliméricas favorece al estado hinchado del hidrogel, (Figura 2c) (Sáez y Sanz, 2003).

Interacción Electrostática

Este tipo de interacción es inversamente proporcional a la constante dieléctrica del medio. Debido a que las cargas presentes en las cadenas poliméricas no pueden desplazarse, los contraiones tienden a estar localizados cerca de ellas para mantener la electroneutralidad del sistema, lo cual provoca la formación de un potencial de Donan entre el interior y el exterior del gel, prevaleciendo la presión osmótica, por lo que el hidrogel se hincha. En estudios basados en diferente pH, se ha encontrado que a pH neutro los hidrogeles se comprimen, mientras que a pHs ácidos o básicos los hidrogeles se hinchan. Por lo que deduce que a pH neutro todas las cargas están ionizadas y se atraen unas con otras de manera que el gel se comprime; en cambio, si una de las cargas está neutralizada y la otra está ionizada el hidrogel tiende a hincharse (Figura 2d) (Llmain, *et al.*, 1991).

Propiedades Importantes de los Hidrogeles Para Aplicaciones Agrícolas

En general, las propiedades de un hidrogel se encuentran basadas en su estructura molecular, y en el método de síntesis mediante el cual fue obtenido. De igual manera, existe una serie de propiedades muy importantes derivadas de la situación de hinchamiento del hidrogel.

Contenido de Agua en el Equilibrio

Los sistemas basados en hidrogeles son muy populares debido a la estructura única que poseen, la cual les permite un gran hinchamiento en presencia de agua, logrando conservar su forma original. El contenido de agua en el equilibrio de un hidrogel depende principalmente de la naturaleza del monómero o monómeros hidrófilos que lo forman, tipo y densidad de entrecruzamiento, entre otros factores tales como, temperatura, fuerza iónica y pH del medio de hidratación.

El comportamiento de hinchamiento es una parte integral del comportamiento físico de los hidrogeles. Desde su preparación, deben estar en contacto con el agua para obtener la estructura solvatada final, el hidrogel obtenido puede someterse a un proceso de hinchamiento en agua; ó ser primeramente secado y luego someterse al proceso de hinchamiento en agua. La Figura 3 indica los dos posibles procesos de hinchamiento de los hidrogeles (Llmain, *et al.*, 1991).

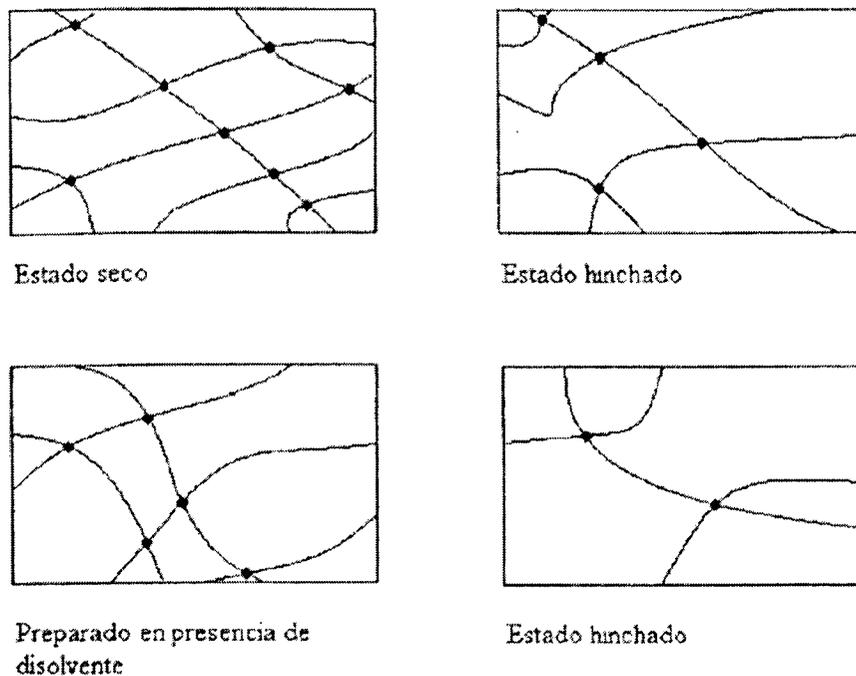


Figura 3. Proceso de hinchamiento a partir del estado seco y parcialmente hinchado.

Los distintos estados físicos en que se encuentran las moléculas de agua dentro de la red polimérica son un aspecto importante para comprender los procesos de difusión de solutos a través de un hidrogel. En hidrogeles el agua se presenta en diferentes estados físicos

como consecuencia de las distintas formas de interacción que se pueden presentar entre el agua y las cadenas poliméricas. El primero consiste en un estado de agua fuertemente asociada a la matriz polimérica mediante enlaces de hidrógeno y un segundo estado de agua con un alto grado de movilidad y que no se ve afectada por el entorno polimérico, ésta se conoce como agua libre. La proporción entre estos tipos de agua es atribuida principalmente al contenido de entrecruzante del polímero (Llmain, *et al.*, 1991).

El agua enlazada juega un papel importante en diferentes procesos biológicos, contribuyendo a la estabilización conformacional de las proteínas e influyendo en la actividad enzimática y procesos de liberación controlada. Hasta hace poco, se consideraba que el agua enlazada se encontraba sólo formando parte de interacciones mediante puentes de hidrógeno con grupos polares del polímero. Sin embargo, mediante el empleo de técnicas calorimétricas y espectroscópicas, recientemente se ha demostrado que ésta también puede estar formando parte de "nanocavidades", con una movilidad muy diferente a la del agua libre. De acuerdo con lo anterior, el agua enlazada por puentes de hidrógeno es sólo uno de los estados físicos del agua en los retículos poliméricos (Sáez y Sanz, 2003).

El agua libre ocupa los espacios entre las cadenas poliméricas y su proporción es uno de los factores que determina la difusión de solutos a través de estos materiales.

La cantidad de agua retenida dentro del hidrogel al alcanzar el equilibrio, puede ser expresada de distinta maneras, como se muestra en las siguientes ecuaciones.

Porcentaje de agua en peso:

$$W = \frac{\text{peso húmedo} - \text{peso seco}}{\text{peso húmedo}} \times 100$$

Porcentaje de hidratación o índice de hinchamiento en peso:

$$H = \frac{\text{peso húmedo} - \text{peso seco}}{\text{peso seco}} \times 100$$

Grado de hinchamiento en peso:

$$D_b = \frac{\text{peso húmedo}}{\text{peso seco}}$$

Estabilidad Dimensional

Tanto el hinchamiento lineal como el hinchamiento en volumen dependen de la cantidad de agua absorbida, por lo tanto, cualquier fenómeno que dé lugar a cambios en el contenido de agua absorbida dará lugar a cambios dimensionales. Tomando en consideración que el contenido de agua absorbida depende de la estructura del material, la composición del hidrogel tendrá un importante efecto sobre la estabilidad del mismo. Entre los factores ambientales que pueden provocar cambios dimensionales en los hidrogeles se encuentran la temperatura, pH, fuerza iónica, campos electromagnéticos, entre otros. Los cambios dimensionales atribuidos al cambio de temperatura se basan en la formación y disociación de puentes de hidrógeno entre las cadenas poliméricas a baja y alta temperatura, respectivamente. La disociación de los puentes de hidrógeno favorece el hinchamiento del material. Por otra parte, el cambio del pH de la solución de hinchamiento provoca cambios dimensionales en los hidrogeles debido a la ionización de los grupos funcionales de las cadenas poliméricas, de esta manera se provoca la repulsión o atracción de las cadenas poliméricas favoreciendo el hinchamiento o compresión de los hidrogeles (Sáez y Sanz, 2003).

Permeabilidad al Oxígeno

La velocidad de transporte de compuestos de bajo peso molecular a través de hidrogeles es un parámetro importante para muchas aplicaciones. En el caso de los hidrogeles, se mide la permeabilidad al oxígeno disuelto en agua en lugar de la permeabilidad al oxígeno gaseoso. Uno de los principales requerimientos en la aplicación de lentes de contacto es que el oxígeno llegue a la córnea. En los hidrogeles la permeabilidad al oxígeno se encuentra regida por el contenido de agua en el equilibrio. En hidrogeles con un contenido de agua menor o igual al 30 %, la permeabilidad al oxígeno se basa en la estructura polimérica que condiciona la proporción de agua unida y de agua libre. En cambio en hidrogeles con contenido de agua mayor al 30 %, la permeabilidad al oxígeno se encuentra en proporción logarítmica al contenido de agua del hidrogel (Sáez y Sanz, 2003).

Originalmente los hidrogeles en agricultura se utilizaron para zonas desérticas y degradadas. Con el tiempo se han utilizado en siembras forestales, agricultura, paisajismo, horticultura, floricultura, frutales, etc. El uso del producto en la forma adecuada reduce los requerimientos de riego entre un 40 y un 60 %.

Cabe mencionar que la importancia del agua con relación a la agricultura se encuentra en que todos los procesos fisiológicos de las plantas involucran este compuesto. El agua constituye el 90% del peso celular de las plantas y es también un reactivo en el proceso de la fotosíntesis. Otro aspecto importante es que el agua es esencial para mantener la presión de turgencia, siendo esto fundamental en el proceso de crecimiento de las plantas. Es necesario aclarar que la absorción es indispensable para el crecimiento y desarrollo de las plantas. En el proceso de absorción, el agua penetra desde la solución del suelo hacia el interior de las células radicales en las raíces por medio de procesos osmóticos, ya que las células radicales tienen una menor concentración de agua que el suelo. La velocidad de absorción de agua está determinada por dos factores: la eficacia del sistema radical y el ambiente (Pineda *et al.*, 2003).

En primer lugar, el sistema radical consta de la raíz que a su vez está compuesta por la epidermis, el tejido fundamental y el cilindro vascular. Las células de la epidermis de una planta tienen como función absorber agua y nutrientes. De ellas parten largas proyecciones tubulares llamadas pelos radicales que aumentan la superficie de la raíz permitiendo una mayor y más eficiente absorción de agua por parte de la planta. El agua absorbida por estos pelos atraviesa el córtex y penetra el cilindro vascular que la conduce hacia el tallo (Barvenik, 1994).

Otro de los factores significativos es el ambiental. La relación es directa de la misma manera que la vida de la planta depende enteramente de las raíces, las raíces dependen del suelo, ya que de éste obtienen el agua y los nutrientes. Con respecto al ambiente en el que se desarrolla la planta, factores como la temperatura del suelo, la aireación y la cantidad de agua disponible y accesible son elementales. En lo que respecta a la cantidad de agua suministrada al suelo, el déficit de ésta y por consiguiente el estrés de la planta afecta su fisiología vegetal (Pineda *et al.*, 2003).

Por tal motivo, el uso de los hidrogeles gracias a sus características de absorción y liberación controlada, los han podido aplicar para resolver diferentes problemas en el área de la agricultura.

Dentro de la producción hortícola, se encuentran cultivos intensivos al aire libre y bajo invernaderos, también denominados de alto rendimiento.

Los terrenos dedicados a esta actividad agrícola mantienen producciones en rotación sin “descanso” para la tierra. Para aquellos que no se utiliza la tecnología denominada “cultivo sin suelo”, el hidrogel viene siendo una herramienta ideal de apoyo tanto técnico como económico para el agricultor.

Sin embargo, la intensificación de los cultivos como por ejemplo los realizados en enarenados bajo invernadero o de alta rotación al aire libre, han venido a obligar el desarrollo de productos más eficaces para este segmento de actividad. En este caso se trata del producto con la tecnología medioambiental (hidrogel.<http://demexcorp.com/hidrogel.html>).

Formulaciones de Hidrogeles Utilizados en la Agricultura

Existen tres grupos principales de polímeros utilizados en estas aplicaciones: co-polímeros de almidón (poliacrilonitrilo-almidón); polivinil alcoholes (copolímeros de ácidos vinil alcohol-acrílicos) y poliacrilamidas (copolímeros de acrilamida sódica-acrilato). Se han desarrollado polímeros adicionados con nutrientes y precursores de crecimiento que además de mejorar las relaciones hídricas en el medio de crecimiento radicular, aportan dichos elementos, y aumentan la capacidad de intercambio de iones que el medio posee (El Hady y Tayel, 1981).

Los Hidrogeles usados en horticultura son generalmente formulaciones hechas comúnmente de los copolímeros del injerto del almidón-poliacrilonitrilo, copolímeros de vinil alcohol - ácido acrílico, y copolímeros de acrilato de sodio de la acrilamida (Woodhouse y Jonson, 1991). Todos estos hidrogeles cuando están siendo utilizados correctamente y en situaciones ideales tendrán por lo menos 95% del agua almacenada disponible para la absorción de la planta (Johnson y Veltkamp, 1985). Los polímeros

naturales como almidón se hidratan totalmente en muy poco tiempo, aproximadamente en dos horas, mientras que los polímeros sintéticos como el polivinilalcohol y la poliacrilamida pueden tardar de seis horas o más para su hidratación (Wang y Gregg, 1990). Generalmente los polímeros sintéticos se utilizan más que los polímeros naturales puesto que tienden a durar más a lo largo de la matriz del suelo porque son menos biodegradables (Aly y Letey, 1989).

En cuanto a sus aplicaciones directas al terreno, sus copolímeros de acrilamida/ácido acrílico a base de sal potásica, al entrar en contacto con el agua, el granulado se hincha formando hidrogeles que almacenan el agua y las sustancias nutritivas disueltas en ésta quedando almacenada a disposición de la planta. Las raíces, gracias a su capacidad absorbente, extraen de los hidrogeles la cantidad de agua y fertilizantes que precisan para cubrir sus necesidades hídricas. Esta reserva de agua constante adquiere mayor importancia cuando actúa protegiendo eficazmente a la planta contra el estrés de la sequedad (<http://www.prof.uniandes>).

Toxicidad en los Hidrogeles

Los polímeros hidrofílicos son importantes puesto que tienen la capacidad de absorber agua, pero este almacenamiento de agua, provoca un aumento de peso del hidrogel, lo que puede causar problemas en su almacenaje (Barvenik, 1994).

Sin embargo, existen otras preocupaciones que rodean el uso de los hidrogeles, especialmente aquellos que son basados en petróleo, como puede ser el caso de las poliacrilamidas, que tienen una baja toxicidad con un LD₅₀ de 5000 mg/kg dosificación oral. La mayor parte de los hidrogeles usados en la agricultura se derivan generalmente de las poliacrilamidas (Barvenik, 1994).

Forma de Aplicación de los Hidrogeles

En el caso de los cultivos masivos o extensivos, se debe aplicar el hidrogel antes de aplicar la semilla, a una profundidad de entre 7 cm a 12 cm, dependiendo el tipo de cultivo, y en caso de aplicar fertilizantes, se puede realizar en forma simultánea. El hidrogel tiene la propiedad de solubilizar los fertilizantes de tal forma que los hace asimilables para las

plantas y los retiene por mayor tiempo en el suelo, evitando de esta manera la lixiviación del mismo (<http://demexcorp.com/hidrogel.html>).

Para mantener el hidrogel en condiciones adecuadas en el suelo, se recomienda que las siembras se realicen a través del sistema de siembra directa para no destruir la capa de gel y este pueda optimizar su vida útil (mínimo 3 años). La aplicación se puede realizar con cualquier tipo de sembradora y/o fertilizadora. En caso de cultivos de siembra manual se deberá dosificar adecuadamente su uso.

En el caso de los cultivos perennes ya establecidos, se coloca el hidrogel alrededor de las raíces secundarias de los árboles a través de orificios que se realizan en el suelo. La cantidad requerida de producto dependerá del diámetro del tronco o de la altura del árbol dependiendo si estos son cultivos forestales o frutales (<http://demexcorp.com/hidrogel.html>).

Nissen (1994) señala que para una mayor eficiencia de acción del hidrogel de poliacrilamidas en frambuesos (*Rubus idaeus* L.), se aplica en forma localizada junto a la raíz debido al peso que ejerce el suelo, su aplicación debe ocurrir a escasas profundidades y cerca del sistema radicular de la planta, de esta manera los rendimientos de frutos pueden aumentar entre un 37.2% y 86%, el diámetro de los frutos puede ser incrementado entre un 0.7 y 3%, mientras que el peso de los frutos puede crecer entre un 3 y un 33%.

Dosificación Recomendada del Hidrogel

La cantidad a utilizarse del producto dependerá del tipo de cultivo, así como también del tipo de suelo que posea el productor y el sistema de producción que utilice. Para el caso de los cultivos extensivos la dosificación puede oscilar entre 10 a 30 kg/hectárea.

No se recomienda el uso del gel en suelos que contienen un pH menor a 4 y mayor a 9 debido a que el gel se degrada con mayor rapidez bajo estas condiciones y cuando el agua posee concentrados de calcio y magnesio, en el caso de los sistemas de riego. Una vez aplicado el hidrogel en el suelo tiene una vida útil de 3 a 5 años. Así mismo, si se desea aumentar la capacidad de retención de agua en el suelo, se puede agregar hidrogel de la forma antes descrita. Debe evitarse la exposición directa del producto a los rayos ultravioleta.

La aplicación normalmente se realiza mezclando en seco el producto con el fertilizante recomendado y la semilla sexual de pasto. No es recomendable aplicar en conjunto con fertilizantes que contengan calcio. En suelos pesados a francos se usan de 25 a 30 kg/ha y para suelos franco arenosos a arenosos de 30 a 40 kg/ha. Normalmente se recomienda incorporar el hidrogel al suelo con un pase de rastra liviana y regar normalmente. Cuando no se dispone de riego se requiere ejecutar esta acción al comienzo del período de lluvias. Cuando la semilla de pasto es asexual (esquejes) se colocará luego de haber esparcido el hidrogel con el fertilizante sobre el suelo e inmediatamente se incorpora utilizando las prácticas normales para este tipo de siembra y regar normalmente <http://demexcorp.com/hidrogel.html>.

Wang y Boogher (1987) encontraron que *Chlorophytum comosum* (cinta o malamadre) requirió doblemente la cantidad de hidrogel para una respuesta positiva. El hidrogel usado no tuvo efecto sobre *Nephrolepis exaltata* (helecho espada), que fue probablemente por la alta evapotranspiración. Una alta concentración de hidrogeles puede modificar o tener efectos secundarios; los hidrogeles pueden crear potencialmente un sistema anaeróbico. Las toxinas causadas por la acumulación de agua llegan a limitar el oxígeno en raíces, presentando marchitez en la planta (Bradford y Yang, 1981).

Cultivos a los que se les Puede Aplicar Hidrogeles

- Cultivos hortícolas (tanto al aire libre como bajo invernadero).
- Cultivos ornamentales (floricultura, arbolado, planta en maceta).
- Cultivos de frutales (frutales de hueso y pepita).
- Otros (cítricos, subtropicales, viticultura, etc.).

El hidrogel se recomienda para cultivos extensivos tales como: soya, maíz, trigo, girasol, sorgo, fríjol y maní, por citar algunos; en el caso de las hortalizas como papa, tomate, brócoli, etc. En los cítricos el uso del hidrogel es muy beneficioso, debido a que los árboles al tener la humedad necesaria para su crecimiento, tienen un desarrollo más acelerado permitiendo de esta manera a la planta alcanzar su fase productiva en periodos más cortos de tiempo (Katime, 2004).

Ventajas del Uso de los Hidrogeles en la Agricultura

Son muchas las ventajas del uso de los hidrogeles en la agricultura como pueden ser retención y disponibilidad de agua, infiltración, aireación, floculación, permeabilidad, reducción de la compactación, número y tamaño de agregaciones, tensión del suelo por el agua disponible, prácticas de manejo de agua, contenido bacteriano y de microflora del suelo, beneficios para la planta, incrementa en un 25% la capacidad germinativa de la semilla, mayor desarrollo vegetativo del cultivo, reducción de mermas en granos y semillas, abastecimiento de los nutrientes, nitrificación del suelo, reducción de clorosis por falta de hierro, reducción del uso de pesticidas (herbicidas y fungicidas), absorbe fertilizantes solubles y los libera paulatinamente, absorción osmótica de nutrientes y de agua por las plantas, incremento del rendimiento en la cosecha (de 25 a 40%, dependiendo del tipo de cultivo), (<http://demexcorp.com/hidrogel.html>).

El desarrollo científico de los últimos años ha permitido incorporar tecnología de punta en el campo para superar la dependencia de las condiciones climáticas, con el objeto de obtener una buena cosecha y reducir los costos de producción. Las estadísticas señalan que en la actualidad el 80 por ciento del agua de la nación es utilizada con fines de riego agrícola; sin embargo, apenas se aprovecha la mitad de estos recursos y lo demás se desperdicia en su flujo natural hacia los mantos freáticos o la evaporación.

Un hidrogel agrícola con base en polímeros acrílicos compatibles con agua para uso en el campo, es una gelatina capaz de retener agua a razón de 300 veces su peso, lo que le permite contener fertilizantes y nutrientes para la planta: "se entierra junto con las semillas y las provee constantemente de los elementos necesarios para lograr su buen desarrollo", con el método tradicional de siembra, la mayoría de los nutrientes y abonos que acompañan a la planta se filtran directamente al subsuelo y lo contaminan; a causa de esta pérdida, hay que agregar grandes cantidades de insumos, lo que eleva el costo de producción. Con el uso del hidrogel, al evitar estos gastos, éste se torna autofinanciable y su vida útil puede ser muy amplia si se le aplica el mantenimiento adecuado (<http://comsoc.udg.mx/gaceta/paginas/125/8-125.pdf>).

Después de un año sólo hay que reponer un 20 por ciento más del hidrogel; si las condiciones climáticas no fueron extremas, en la siguiente temporada puede que no sea necesario agregar nada. Las pruebas de campo han demostrado que al utilizar la gelatina las cosechas aumentan hasta en un 30 por ciento en relación con el método tradicional, y con mayor calidad. La efectividad del hidrogel se da en la reforestación, en la que normalmente el 80 por ciento de los árboles que son plantados se secan, pero al utilizar el hidrogel, los porcentajes se invierten y sólo se dan pérdidas en un 20 por ciento. Primeras investigaciones sobre estos productos se llevaron a cabo en Israel, donde ya es posible sembrar en el desierto gracias a este sistema (<http://comsoc.udg.mx/gaceta/paginas/125/8-125.pdf>).

Retención del Agua en el Suelo por la Acción de los Hidrogeles

Los hidrogeles poseen la propiedad de captar agua en cantidades considerables aumentando así su volumen, sin disolverse y manteniendo su forma blanda y elástica; siendo capaces posteriormente de cederla; sin embargo, hay que tener en cuenta que no todos los polímeros que absorben agua son iguales, aunque su aspecto sea muy parecido. Su estructura química, la estructura física de su red y la densidad de ésta pueden variar mucho y afectar a la capacidad de absorción y liberación de agua.

Debido a la propiedad de absorción y liberación de agua, estos materiales pueden mejorar la capacidad de retención de agua del suelo, favoreciendo por tanto el desarrollo de las plantas (Figura 4). En esta figura se representa la retención del agua en el suelo por la acción de los hidrogeles y de esta forma se consigue aprovechar mejor el agua de la lluvia, la que ya no se pierde tan fácilmente por filtración o por evaporación, haciendo al suelo más productivo (<http://comsoc.udg.mx/gaceta/paginas/125/8-125.pdf>).

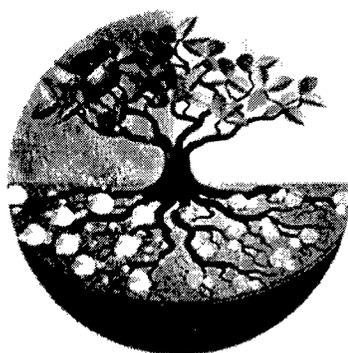


Figura 4. Representación de la retención de agua en el suelo usando hidrogeles.

Los hidrogeles se usan para recuperar terrenos de cultivos que han sido abandonados o son poco fértiles porque se han empleado de forma muy extensiva. También se suelen mezclar con abonos, ya que proporcionan una reserva de agua para las primeras fases más difíciles de adaptación en la reforestación. Por otro lado, al poderse incorporar fertilizantes en la estructura del hidrogel, el cual puede liberarlos gradualmente que los productos químicos aplicados al cultivo se pierdan por lixiviación o lavado y por lo tanto se genere un ahorro en su uso, así como una reducción en la contaminación ambiental, (Rojas *et al.*, 2006).

Sayed y colaboradores (1991) estudiaron, el efecto del hidrogel de poliacrilamidas en varios cultivos hortícolas, en condiciones de sustratos salinos, los cuales presentaron aumento de peso en materia seca de las plantas, en área foliar, savia, color de clorofila, clorofila de carotenoides; actividad fotosintética, total de aminoácidos, prolina y proteína total, comparado con los resultados del cultivo en arena. Los mismos autores afirman que el polímero es altamente eficiente para ser usado como acondicionador del suelo principalmente en la horticultura, ya que en él aumenta la tolerancia de las plantas y las condiciones de los sustratos arenosos y salinos.

Azevedo (2000) estudió la eficacia del hidrogel de poliacrilamidas en el abastecimiento de agua para el cultivo del café (*Coffea arabica* L.), Aplicando el hidrogel en la parte inferior de la planta de café con el propósito de evaluar su eficiencia. Las pruebas se realizaron en un invernadero en el cual las plantas del semillero presentaron mejoras significativas en la altura de las plantas, materia seca de la parte aérea y materia seca de la planta, pudiendo así mismo afirmar que la presencia del hidrogel en la capa inferior permite ampliar los intervalos de irrigación, sin el compromiso del crecimiento de la planta por el déficit del agua; además, entre menor sea el abastecimiento de agua, mayor será la importancia del hidrogel.

Al tener la propiedad de absorción de agua, el uso del hidrogel en la agricultura es muy benéfico, debido a que al ser utilizado en la forma correcta, el hidrogel retiene el agua por mucho más tiempo en el suelo, proporcionando de esta manera a las plantas la humedad que estas requieran para su desarrollo; de esta manera liberan a la planta del estrés hídrico que pueda tener en periodos de sequía y evitando pérdidas económicas para el agricultor. El producto también mejora las características del suelo, como son la retención y

disponibilidad del agua, la aireación y la descompactación (<http://comsoc.udg.mx/gaceta/paginas/125/8-125.pdf>).

En cultivos masivos se obtienen muy buenos resultados, ya que en el proceso de floración, etapa en la que la planta necesita mayor humedad para generar mayor rendimiento del cultivo (envainamiento, macollamiento, etc.), con el uso del hidrogel en período de escasez de lluvias se alivia a la planta del estrés hídrico. Consecuentemente, la calidad de los cultivos de semillas, granos, tubérculos y hortalizas se ven beneficiados.

Disminución de la Lixiviación Nutritiva

La adición de hidrogeles en la tierra optimiza la disponibilidad del agua, reduce las pérdidas por infiltración, lixiviación de nutrientes, mejora la aireación y el drenaje de la tierra, acelerando el desarrollo del sistema a radicular y la parte aérea de las planta como se representa en la figura 5. En esta figura se ejemplifica el comportamiento de la planta al aplicar hidrogel, mientras que en ausencia del mismo, los nutrientes tienden a lixiviar (Curitiba, 2005).

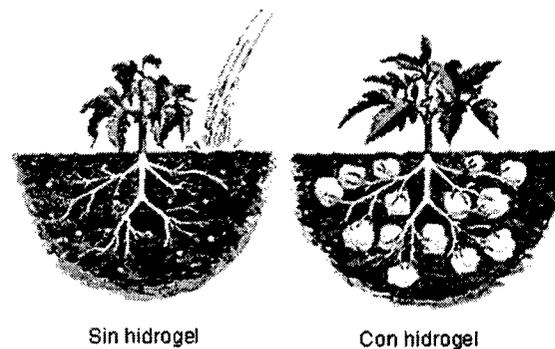


Figura 5. Disminución de la lixiviación nutritiva con el uso de hidrogeles.

Fry y Butler 1989, han reportado que el uso de hidrogeles de poliacrilamidas aumenta la cantidad de humedad disponible en la zona de la raíz, permitiendo el manejo de intervalos más largos entre las irrigaciones. Debe ser precisado que los polímeros no reducen la cantidad de agua usada por las plantas. La capacidad del agua depende de la textura del suelo, del tipo de tamaño del hidrogel y de la partícula (polvo o los gránulos), de la salinidad de la solución del suelo y de la presencia de iones. Las poliacrilamidas reticuladas absorben hasta 400 veces su peso en agua y liberan un 95% del agua que

conservan dentro del gránulo a las plantas crecientes. Sin embargo, la capacidad de retención del agua cae notoriamente en los sitios en donde la fuente del agua de la irrigación contiene altos niveles de sales disueltas o en presencia de las sales del fertilizante (Wang y Gregg 1999). La cantidad de agua retenida por el hidrogel también es afectada de manera contraria por los productos químicos o los iones (Mg^{2+} , Ca^{2+} , Fe^{2+}) presentes en el agua. Johnson (1984b) sugirieron que estos cationes bivalentes desarrollan fuertes interacciones con los hidrogeles y pueden desplazar las moléculas de agua atrapadas dentro del polímero, aun cuando los cationes monovalentes (Na^+) pueden también substituir las moléculas de agua.

El uso del hidrogel conduce a la eficacia creciente del uso del agua puesto que se captura el agua que se lixivia más allá de la zona de la raíz. Durante días calurosos, los pelos absorbentes del sistema radicular se secan y la planta entra en estrés; entonces la mayor parte del agua que se encuentra cerca del sistema de la raíz provoca que la planta entre en tensión. A medida que aumenta la cantidad de humedad disponible, los hidrogeles ayudan a reducir la tensión del agua en las plantas dando por resultado el funcionamiento del crecimiento de la planta (El Hady y Tayel, 1981).

Los hidrogeles de poliacrilamidas pueden reducir la lixiviación del fertilizante como son; Nitrógeno, Fósforo y Potasio (NPK). Esto parece ocurrir con la interacción del fertilizante con el polímero. Los fertilizantes de NPK aplicados directamente en los geles reticulados de poliacrilamida, están recibiendo cada vez más atención a nivel de la investigación. La poliacrilamida reticulada también se está considerando como portador potencial para los insecticidas, los fungicidas y los herbicidas (Jhurry 1997).

Mikkelsen y colaboradores (1993) desarrollaron estudios para determinar si la adición de polímeros gelificadores, hidrofílicos a las soluciones del fertilizante de nitrógeno podían reducir la pérdida por lixiviación y aumentar el crecimiento de las plantas. En un estudio a nivel laboratorio se evaluó una solución de nitrato de amonio, urea líquido nitrogenado (UAN, el 32% N) mezclados con un hidrogel de poliacrilamidas en tres concentraciones. El hidrogel se aplicó en un suelo arenoso y se sometió a la lixiviación durante seis semanas. Las pérdidas por lixiviación de nitrógeno se redujeron en un 45% durante las primeras cuatro semanas debido a la presencia del hidrogel. En estudios a nivel de campo en el cultivo de gramíneas, aplicando el hidrogel adicionado con fertilizantes la lixiviación

de nitrógeno, observando que ésta se redujo en un 26%, 16% y 7% para las primeras cuatro semanas. Cuando se aplicó UAN junto con el hidrogel, la acumulación de nitrógeno aumentó en un 40%. La pérdida por lixiviación de nitrógeno se logró reducir temporalmente y hubo recuperación en la planta con el uso de hidrogeles de poliacrilamida.

Aprovechamiento de los Nutrientes

El agua no es un factor limitante en la matriz del suelo al agregar hidrogeles, pero con la adición del hidrogel, la disponibilidad de nutriente puede convertirse en el factor limitante para el crecimiento vegetal (Wallace y Abouzamzam, 1986; Wallace y Wallace, 1990). Los polímeros hidrofílicos, sin embargo, tienen la capacidad de incrementar el crecimiento vegetal cuando los nutrientes se incorporan en la matriz del hidrogel. McGrady y Cotter (1987) agregaron fósforo al hidrogel y observaron un aumento en el crecimiento de la planta de chile pimienta (*Capsicum annuum*). Finch-Savage y Cox (1982) agregaron el fosfato de sodio al hidrogel y observaron un aumento significativo en el crecimiento de la planta de lechuga y cebolla. El tamaño del bulbo adulto del *Allium* sp. (cebolla) no desarrolló pero el promedio de *Lactuca sativa* (lechuga) sí incrementó. El incremento fue por la accesibilidad de los nutrientes disponibles en el agua.

Taylor y colaboradores, (1986) midió el lixiviado del suelo al incorporar el hidrogel y encontró que tenía conductividad eléctrica baja, indicando que el hidrogel conservó la mayor parte de los fertilizantes y las sales adheridos a la matriz del suelo del árbol *Ligustrum lucidum* (trueno), establecido por mucho tiempo sin irrigación, cuando los hidrogeles fueron agregados, los niveles de nitrógeno y de potasio aumentaron considerablemente en el tejido de la planta, sin embargo fueron deficientes en calcio, magnesio y hierro (cationes bivalentes). Bajo ciertas circunstancias, la adición de los hidrogeles proporciona poca influencia en el funcionamiento de la planta, especialmente cuando tienen cantidades altas de sales y fertilizantes que están presentes (Swietlik, 1989).

Mejora en la Disponibilidad del Agua a las Plantas

Cuando las plantas necesitan agua y nutrientes, los absorberán sin dificultad de las reservas almacenadas en los hidrogeles. Cuando nuevamente se riegue o llueva, los hidrogeles se volverán a cargar de agua evitando su pérdida por filtración y/o evaporación. De esta forma se pondrá nuevamente a disposición de las plantas una gran reserva de agua y

nutrientes. Este proceso se repetirá durante muchos años hasta que el hidrogel pierda sus propiedades fisicomecánicas y mientras esto ocurre proporciona los siguientes beneficios: (<http://demexcorp.com/hidrogel.html>).

La aplicación de hidrogeles mejora la disponibilidad del agua a las plantas presentando los siguientes beneficios.

1. Un mejor y más rápido desarrollo radicular de la planta debido a una mayor porosidad, aeración, esponjamiento.
2. Autorregulación del consumo de agua por las plantas mismas gracias al sistema de retención de agua de los polímeros hidroabsorbentes, evitando el estrés hídrico que sufrirían ante una falta de riego o una prolongada sequía.
3. Un mejor y más profundo arraigo de las raíces.
4. Una mayor absorción de los nutrientes por la mayor masa radicular, lo cual producirá plantas más vigorosas y que soportarán mejor las inclemencias del tiempo y las enfermedades.
5. La planta tiene una fuente de agua prácticamente a su disposición gracias a la gran capacidad de filtración que tienen los polímeros hidrófilos al absorber el agua.
6. Mejor crecimiento de las raíces, foliación y formación de biomasa por los estimuladores de crecimiento.

Los hidrogeles actúan almacenando el agua alrededor de las raíces asegurando que estas tengan la humedad suficiente, evitando así que las raíces se sequen como se observa en la figura 6. De la misma manera aumenta el crecimiento de las plantas transplantadas, al disminuir el “estrés hídrico” que sufren en este procedimiento, aumenta la supervivencia de las plantas al permitirles sobrevivir a los períodos de “estrés” producidos por sequía o trasplantes. Se utiliza en raíces de plantas y árboles para ser transportados disminuyendo el riesgo de “estrés”, permiten el crecimiento en los meses secos y cálidos del año.

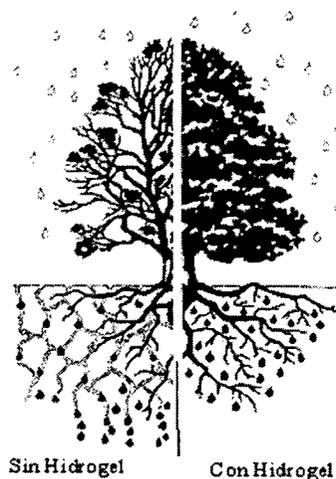


Figura 6. Almacenamiento de agua en las raíces con y sin hidrogel.

Ventajas en el Riego con el Uso de los Hidrogeles

Cuando los cultivos poseen las condiciones óptimas de humedad, aireación, temperatura, etc., su rendimiento es más elevado. Con el uso del hidrogel se pueden reducir los ciclos de riego de un cultivo debido a que la fluctuación de humedad en la zona radicular de los cultivos es más lenta, ya que se genera un stock de agua disponible para el cultivo. Con respecto a la aireación y retención de agua, más de 90% de la humedad absorbida por los cristales del gel se encuentra disponible para la planta. En mezclas con sustrato no hay otro componente que retenga esta cantidad de agua y lo proporcione lentamente a la planta. A consecuencia de la expansión y contracción de los cristales de hidrogel, se logra separar las partículas del suelo, abriendo y descompactando el sustrato, permitiendo la aireación que necesita el suelo para poder tener los nutrientes necesarios para la planta para lograr un uso de agua más eficaz (<http://demexcorp.com/hidrogel.html>).

La capacidad de retener por más tiempo la humedad presente en el suelo, es una de las mayores ventajas del uso de los hidrogeles (Figura 7).



Figura 7. Ventajas en el riego con el uso de hidrogel.

Los suelos arcillosos, por ejemplo, retienen una gran parte del agua, pero menos de la mitad de ésta está disponible para las raíces. Con el hidrogel más del 90% del agua retenida está disponible para las raíces, el hidrogel es súper absorbente y funciona en cualquier tipo de suelo. En diversos estudios se ha demostrado que se puede cultivar directamente en el hidrogel sin usar tierra o sustrato (Carhuapoma y Santiago, 2005).

Nissen y Hoffmann (1998), estudiaron el efecto de cuatro diferentes manejos hídricos sobre la producción de fresa (*Fragaria x ananassa* D.), para ello se utilizó un acondicionador del suelo (hidrogel de poliacrilamidas) en dos dosis (100 y 50g hidrogel/m²), comparado con un tratamiento con riego por goteo y un testigo con el fin de medir parámetros de productividad. Los mayores rendimientos se obtuvieron con hidrogel aplicado al suelo y con riego. Los tratamientos con hidrogel no tuvieron diferencias significativas entre sí (2.968 y 2.538 kg/ha para 100 y 50 g hidrogel/m², respectivamente), pero sí con el testigo, el cual produjo sólo 1.094 kg/ha. El factor que marcó la diferencia entre los rendimientos obtenidos con riego y los que llevaban hidrogel fue el número de cosechas realizadas, las cuales fueron 17 usando riego, 11 con hidrogel y sólo 9 cosechas en el testigo sin riego. De igual manera se observó que las plantas tratadas con el hidrogel presentaron los frutos más grandes comparados con los otros tratamientos.

Uso Eficiente de Fertilizantes

El hidrogel al absorber el agua que contiene fertilizantes, libera estos fertilizantes paulatinamente con el suelo, lo mismo sucede con otros componentes solubles en agua, esta propiedad del hidrogel puede resultar en grandes ahorros de costos para el agricultor, siendo esta opción más económica que otros sistemas tradicionales de liberación lenta de

fertilizantes ya que éste queda encapsulado en el hidrogel y los suministra a la planta en forma periódica (<http://demexcorp.com/hidrogel.html>)

Mikkelsen y colaboradores (1995), analizaron el efecto de la aplicación del hidrogel de poliacrilamida en la recuperación de la planta con los fertilizantes comúnmente usados como el manganeso en la soya (*Glycine max* L. Merr). Se usaron cuatro fuentes del manganeso MnO, MnSO₄·4H₂O, MnCl₂ y MnEDTA junto con el hidrogel, la acumulación del manganeso de la hoja aumentó en promedio el 89%. La acumulación del manganeso en la planta fue mayor, así como abundantes raíces en comparación con el tratamiento que no se le proporciono hidrogel. En conclusión el uso de polímeros hidrofílicos ayudan a la recuperación en las plantas y pueden disminuir el uso del magnesio o hacer las aplicaciones menos frecuentes.

Aumento en la Capacidad de Intercambio Catiónico

En ausencia de hidrogel, el suelo se seca rápidamente, impidiendo el proceso de germinación. El líquido en el cual el hidrogel se hincha suele tener, a menudo, sales disueltas. Su naturaleza y cantidad depende de la composición del estrato, el grado de salinidad, el tipo de agua o incluso de los fertilizantes que se hayan utilizado. Generalmente los componentes mayoritarios suelen ser cationes alcalinos (Ca²⁺, Mg²⁺, Fe³⁺, Al³⁺) y aniones como Cl⁻, CO₃²⁻, SO₄²⁻. Hay que tener en cuenta que los electrolitos disueltos ejercen una gran influencia en el grado de hinchamiento del hidrogel. Esto hace necesario emplear una cantidad mayor de hidrogel, lo que implica una disminución del rendimiento económico del proceso (Katime, 2004).

Los hidrogeles absorben por proceso físico agua y la almacenan de forma que las raíces de las plantas la puedan absorber a través de los pelos radicales, en condiciones de sequía los hidrogeles ayudan a disminuir el proceso de secado de la raíz y permiten que las plantas sobrevivan en condiciones áridas o semiáridas.

Los hidrogeles aumentan el crecimiento lateral de las raíces pero tienen un efecto neutro en el comportamiento de las raíces individuales (Katime, 2004).

Algunos hidroretentores son capaces de actuar como proveedores de nutrientes, disminuir el ajuste de fosfatos y la lixiviación de los nutrientes como el potasio, magnesio y nitratos (Nissen, 1994).

Bres y Weston (1993) aplicaron 0.88 g de nitrato de amonio con diferentes tipos de hidrogeles con base de poliacrilamida. Las dosis fueron de 1.0, 2.0 y 3.0 kg·m⁻³ de hidrogeles en un plantío de tomate, mostraron que la retención de agua aumentó en forma lineal con el uso del gel. Un total de 67% de nitrógeno aplicado en forma de amonio estaba retenido por el hidrogel y para el nitrógeno en forma de nitrato, la retención fue de 4% del total aplicado, independientemente del tipo de polímero usado. Esta diferencia puede estar relacionada con el potencial de carga negativa o la capacidad de intercambio catiónico del polímero.

Tittonell y colaboradores (1999) evaluaron la capacidad de los hidrogeles en la producción de plantíos de pimienta. Un hidrogel a base de un copolímero de propenamida-propeonato se adicionó a sustratos preparados con y sin materiales compostados y a un sustrato comercial. Se caracterizó el comportamiento del mismo a través de la tasa de crecimiento y características cualitativas de los plantíos. La adición del hidrogel al sustrato permitió mejorar la precocidad, uniformidad y tamaño de plantines de pimienta, especialmente en las mezclas carentes de compostados. En dichos tratamientos, la tasa de crecimiento aumentó principalmente como consecuencia de un mejor desarrollo foliar, ya que la tasa de asimilación no fue afectada significativamente en todos los casos. La relación vástago/raíz no fue afectada favorablemente por la adición del hidrogel y dependió más del tipo de sustrato empleado. Mediante la adición del polímero los parámetros de calidad del plantío mejoran, ya sea por una mayor retención hídrica, por una mayor capacidad de intercambio iónico, o por ambas razones.

Efectos del Hidrogel

La aplicación de hidrogeles en el suelo trae como consecuencia los siguientes efectos (respiración, transpiración, germinación, etc.) que se describen a continuación.

Efectos del Hidrogel sobre la Transpiración de la Planta

La transpiración de las plantas puede ser afectada por el uso de los hidrogeles, ya que estos aumentan potencialmente la disponibilidad del agua; Specht y Harvey-Jones (2000) observaron un incremento en el consumo del agua y en la actividad de estomas en *Flindersia brayleana* (Arce de Queensland), *Dysoxylum muelleri* (Caoba de Miva), *F. australis* (*Flindersia australis*), *Eucalyptus grandis* (eucalipto rosado), y *Grevillea robusta* (Roble australiano o pino de oro) cuando el hidrogel fue incorporado dentro del medio. *Flindersia brayleana* y *Dysoxylum muelleri* mostraron un incremento en la biomasa de la planta asociado con el aumento de la transpiración y la absorción de dióxido de carbono, mientras que *F. australis* y *Grevillea robusta* (especies tolerantes a la sequía) no aumentaron significativamente. En este estudio se observó también que en plantas tolerantes a sequía el porcentaje de transpiración aumentó cuando los hidrogeles fueron adheridos al medio, pero en el crecimiento de las plantas la diferencia fue mínima comparada con el medio exento de hidrogeles. Ingram y Yeager (1987) encontraron en *Ligustrum japonicum* (trueno del Japón) un aumento en el consumo del agua, pero el peso seco de la planta disminuyó.

Los hidrogeles reducen los efectos de las sales en la matriz del suelo, aunque limitan la capacidad de carga en el agua. La salinidad en los suelos afecta el crecimiento vegetal por la inhibición osmótica del agua, el desequilibrio de los nutrientes es causado por la gran cantidad de sales y los efectos tóxicos por las altas concentraciones en el suelo (Sayed *et al.*, 1991). El contenido excesivo de sales, puede impedir el crecimiento y causar deformidad en las hojas hasta ocasionar la muerte en ciertas plantas, especialmente en cultivos hortícolas. La incorporación de los hidrogeles dentro de un medio donde el contenido de sales era alto, incremento la vitalidad de la planta.

Sayed y colaboradores, (1991). Mencionan que el tomate (*Lycopersicon esculentum*) y pepino (*Cucumis sativus*) no sobrevivieron a concentraciones de 8,000 ppm de sal y en suelo arenoso y la lechuga (*Lactuca sativa*) no sobrevivió a más de 4,000 ppm de sal. Sin embargo, cuando el hidrogel fue incorporado a este suelo, las tres especies sobrevivieron a concentraciones de 32,000 ppm de sal, siendo mejores que en sustratos de arena que no contienen sal.

Los hidrogeles pueden también reducir las fluctuaciones de temperatura en el suelo, Boatright *et al.*, (1997) observaron que al agregarle hidrogeles al suelo la temperatura de éste fue menor. Roule (1992) indicó que el uso de los hidrogeles puede mantener una temperatura estable para las raíces en épocas calurosas del verano.

Efectos de la Presencia de Micorrizas al Incorporar Hidrogel en las Plantas

La asociación de micorrizas en las raíces de las plantas han reportado que pueden reducir índices de transpiración en las plantas. Las micorrizas son hongos simbióticos asociados con las raíces de las plantas que ayudan a la absorción de los nutrientes en las mismas. En este estudio realizado *Rosa multiflora* (rosal trepador) con reducción de riego en contenedores se observó que el aumento de la transpiración incrementó con la incorporación de los hidrogeles, pero el porcentaje de transpiración disminuyó cuando las micorrizas (*Glomus mosseae*, y *G. fasciculatum*) fueron incorporados con los hidrogeles. El uso de los hidrogeles puede ser benéfico para aumentar la inoculación de las raíces con micorrizas una vez que se disminuye el pH a 5.5 y 6.0 (Davies *et al.*, 1987).

En otro caso, se encontró que el uso de un hidrogel a bajo pH era un buen portador para la inoculación de micorrizas en sistemas aeropónicos, pero no ayudó a la germinación de las esporas de micorrizas (Hung *et al.*, 1991).

Efectos del Uso de Hidrogel en la Germinación de la Semilla

Las semillas de muchas especies poseen diferentes tasas de germinación, las cuáles se incrementan con el uso de hidrogeles. Entre otros factores, el incremento en la germinación depende de las condiciones de siembra y del tipo de semilla, en cualquier caso con el uso de hidrogeles son comunes los incrementos del 12 al 25% (Rojas, 2004).

El porcentaje de germinación se puede elevar cuando se utilizan hidrogeles, especialmente en ambientes áridos y semiáridos (Woodhouse y Johnson, 1991a), de igual manera encontraron que la disponibilidad del agua en el suelo es fundamental para la germinación de la semilla. De igual forma demostraron que el porcentaje de germinación de la semilla disminuye si el agua no está en contacto con el suelo esto se presenta en condiciones áridas y semiáridas. Observaron que la incorporación del hidrogel en un (0.5%) en la estructura del suelo del *Hordeum vulgare* (cebada), *Trifolium repen* (trébol blanco), y *Lactuca sativa* (lechuga). Por su parte, Rubio *et al.*, (1989) encontraron que el uso de los hidrogeles incorporados en el suelo redujeron el efecto del “sello” de suelos secos y crearon una capa permeable en la cual la germinación era mayor para *Bouteloua*

curtipendula (Zacate Banderilla), *Sporobolus airoides* (Zacate de agua), y *Eragrostis chloromelas* (damalisco). Sabota y Biedermann (1987) encontraron que el maíz dulce prerremojado en hidrogel disminuyó su tiempo de germinación, esta disminución podría potencialmente acelerar el crecimiento del maíz en suelos fríos, ya que bajo estas condiciones son bajos (menos de 10°C.) Odell y Cantliffe (1987) encontraron que la incorporación de los hidrogeles de poliacrilamida (PAM) era beneficiosa para la supervivencia pregerminativa de la semilla para prevenir la desecación radical emergente. Odell y colaboradores (1992) reportan que el tomate (*Lycopersicon esculentum*) respondió con grandes porcentajes de germinación al aplicar hidrogel.

Cook y Nelson (1986) indicaron que la formulación de poliacrilamida (PAM) es también importante para la germinación de *Medicago sativa* (alfalfa) puesto que el hidrogel granular no disminuyó el tiempo de la germinación, mientras que el hidrogel pulverizado si lo hizo.

Los hidrogeles pueden potencialmente dañar a las semillas proporcionando demasiada agua. (Baxter y Water, 1986a). El porcentaje de germinación puede aumentar cuando la semilla está en contacto con el agua por largos períodos de tiempo. La diferencia en los porcentajes de germinación se podría atribuir a la disponibilidad del agua que contienen los geles hidrofílicos.

En algunos casos se ha observado que los hidrogeles pueden disminuir realmente los índices de germinación en algunas plantas (Baxter y Water, 1987; Henderson y Hensley 1987; Woodhouse y Jonson, 1991).

Rojas y colaboradores (2006) estudiaron la germinación de semillas de tomate en suelos áridos extraídos de la Península de Araya, ubicados en Guayacán (Estado Sucre, Venezuela), mezclados con hidrogeles. Se utilizó un hidrogel comercial que se mezcló con el suelo sobre la base de dos diseños experimentales, aplicados en dos etapas. El primer diseño fue de tres variables a dos niveles: la primera variable fue la cantidad de hidrogeles mezclada con el suelo; la segunda fue el hinchamiento de los hidrogeles en agua antes de mezclarlos; la tercera fue el tiempo de riego: 3 y 15 días. En estas condiciones se sembraron 40 semillas certificadas de tomate en cada condición manteniendo el riego durante cuarenta días. La utilización de una mayor cantidad de hidrogeles en la tierra favoreció la germinación de un mayor número de plantas, hasta en un 100% más que

cuando se usó una menor proporción (ver figura 8). Estos resultados evidenciaron que la utilización de una mayor cantidad de hidrogeles facilita la absorción por parte de las semillas de mayores cantidades de agua, la cual se libera posteriormente hacia la semilla a medida que el suelo se seca alrededor del hidrogel, constituyendo una reserva de agua que permite aprovechar mejor el agua de riego y aumentar la capacidad de reserva en las plantas.

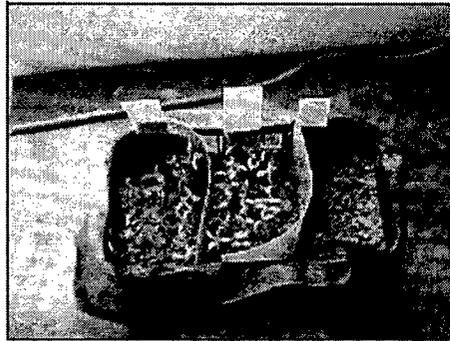


Figura 8. Semillas de tomate germinadas para distintas proporciones de hidrogel/suelo de Araya, Etapa 1: (División central) donde se aplicó el 1.0% de hidrogel, (División derecha) corresponde a 0.0% de Hidrogel y (División izquierda) es donde se utilizo la menor cantidad de Hidrogel que fue de 0.5%.

En este estudio se encontró también que el aumento de la concentración de hidrogeles en la tierra favorece la germinación de un mayor número de semillas. Estos resultados demuestran que una mayor cantidad del hidrogel se constituye en una mayor reserva de agua debido a las interacciones que pueden establecerse entre los grupos hidrófilos del hidrogel y el agua, lo cual aumenta la retención de la misma en el suelo (Figura 9).

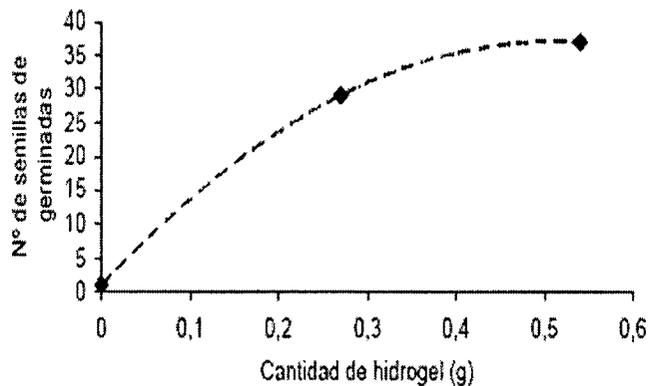


Figura 9. Número de semillas germinadas con respecto a la cantidad de hidrogel.

Se presenta la germinación de las semillas de tomate en función del tiempo para las condiciones donde se encontraba el suelo de Araya con hidrogel y sin la presencia de este. En ella se aprecia una diferencia notable en la cantidad de semillas que germinaron en el suelo donde estaba presente el hidrogel, en comparación a las semillas sembradas en el suelo de Araya en su estado natural donde solo el 10% de las semillas logró germinar. (Figura 10).

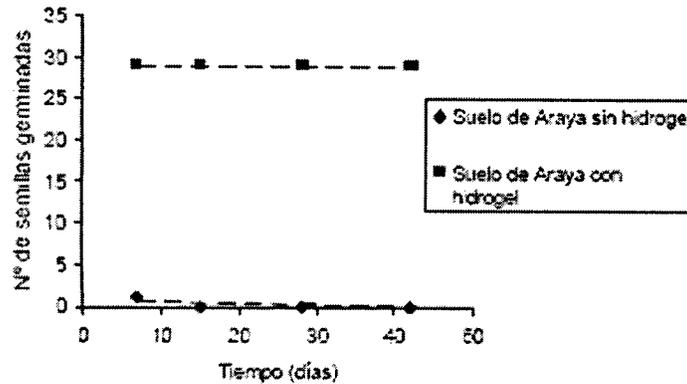


Figura 10. Número de semillas germinadas al usar hidrogel

Por lo tanto podemos decir que en este trabajo se demostró que la presencia de los hidrogeles favoreció la germinación de las plantas de tomate en comparación con el suelo de Araya en estado natural. Estos resultados permiten decir que, en principio, la presencia de los polímeros y su capacidad de absorber y retener agua tienen un efecto positivo sobre la germinación y el crecimiento de plantas en este tipo de suelos.

Efecto de los Hidrogeles en el Semillero, Trasplante y Establecimiento de las Plantas.

Los Hidrogeles han sido utilizados en el campo, para el establecimiento y la producción de cultivos anuales y perennes. Las plantas instaladas en medios con hidrogeles han tenido diversas respuestas. Por ejemplo, las plantas que requieren más humedad son las más beneficiadas al adicionar los hidrogeles, pero pueden ocurrir respuestas negativas al ser utilizados en ambientes que son naturalmente húmedos. Las plantas pueden requerir diferentes cantidades de hidrogel dependiendo del estado fisiológico de la planta (Mogensen, 1980).

El hidrogel puede mejorar el crecimiento y el establecimiento de las plantas del semillero aumentando su capacidad de retención del agua de los suelos y regulando los

abastecimientos de agua disponibles de las plantas, particularmente bajo ambientes áridos. (Akhter, 2004) estudió los efectos del hidrogel en tres especies de plantas: cebada (*Hordeum vulgare* L.), trigo (*Triticum aestivum*) y garbanzo (*Cicer arietinum* L.). La absorción del agua por el hidrogel es rápida (sólo inhibida por el aumento en la salinidad del agua). La adición de 0.1, 0.2 y 0.3% de hidrogel aumentó la retención de la humedad en la capacidad del campo lineal ($r = 0.988$). La germinación de la semilla de trigo y de cebada no cambió pero, el crecimiento de la planta en almácigo de ambas especies fue mejorado mediante la aplicación del hidrogel. La germinación de la semilla del garbanzo fue más alta en un 0.2%.

Los hidrogeles se han utilizado en almácigos y para el trasplante en regiones áridas de África y Australia para un mejor acondicionamiento (Specht y Harvey-Jones 2000). En estudios realizados encontraron que las especies de árbol menos tolerantes a la sequía tenían una respuesta mucho más favorable con la incorporación de hidrogeles. *Flindersia brayleana* y *Dysoxylum muelleri* aumentaron sus pesos secos totales cuando los hidrogeles fueron incorporados en el substrato, mientras que las especies tolerantes a la sequía como: *Flindersia australis* y *Grevillea robusta* no mostraron ningún efecto significativo en el peso seco total (Specht y Harvey-Jones, 2000). En Sudán plantaron eucalipto (*Eucalypto microtheca*) incorporando hidrogeles de poliacrilamidas (PAM) y polivinialcohol (PVA) en suelos arenoso (Callaghan *et al.*, 1989). Al inicio, los ensayos se establecieron en ausencia de la irrigación, comparado la supervivencia que existió entre los que se les aplicó riego y los que se les incorporo hidrogeles, con lo cual demostraron que al aplicar hidrogel el índice de supervivencia fue mejorado al doble comparado con los de riego. En cantidades reducidas de riego, el porcentaje de supervivencia fue de 1.4 a 1.6 veces mejor con aplicación de hidrogel (Callaghan *et al.*, 1988, 1989). Al aplicar el riego se redujo el estrés en el trasplante. Pero cuando se les quito el riego únicamente por seis días todas las plantas del almácigo murieron, mientras las que fueron tratadas con hidrogel el índice de supervivencia fue de 57% a 71% (Callaghan *et al.*, 1989). En estudios efectuados con *Pinus halepensis* se observaron aumentó de la sobrevivencia en un 0.4% en los suelos que se les aplico hidrogel comparados con los que no fueron tratados con hidrogel. El hidrogel también prolongó la disponibilidad de agua para el uso de la planta cuando la irrigación fue suspendida. Las plantas tratadas con hidrogel comenzaron a morir hasta el día 19, mientras que a las plantas que no se les adhirió el hidrogel murieron después del día 5 cuando el riego fue suspendido (Huttermann *et al.*, 1999).

En almácigos de *Pinus peña*, las plantas sobrevivieron de 1.4 a 2.0 veces más con el uso de los hidrogeles comparados con tratamientos sin hidrogeles en la producción de campo (Save *et al.*, 1995). El *Pinus halepensis* también había aumentado el crecimiento de las raíces adventicias junto con masa total de la planta cuando el hidrogel fue agregado a los medios (Huttermann *et al.*, 1999), observaron que el follaje de las plantas del *Photinia x fraseri* respondieron en un incremento de materia seca a la incorporación de hidrogeles en los medios.

Los hidrogeles generalmente tienen efecto en el establecimiento de la planta, con grandes beneficios para las plantas que requieren humedad en condiciones secas. *Festuca arundinacea* fue beneficiada al aplicar hidrogel al suelo donde iba a ser establecida. El suelo requirió cantidades grandes de hidrogel (mayor al 1 % del volumen del suelo) para alcanzar una respuesta benéfica del *F. arundinacea* en medios de invernadero, los autores concluyeron que se necesitan cantidades mayores para obtener los mismos resultados al aire libre que en invernadero (Fry y Butler 1989).

La incorporación de hidrogeles dentro de medios de arena para tomate (*Lycopersicon esculentum*), lechuga (*Lactuca sativa*), rábano (*Raphanus sativa*), y trigo (*Triticum aestivum*) incrementaron su peso seco y tardaron más en marchitarse al suspenderles el riego, en tanto que *Pyracantha coccinea* (espino de fuego) y *Rhododendron* sp. (Azalea) sobrevivieron por más tiempo e incrementaron el peso seco cuando el hidrogel fue aplicado al medio (Henderson y Hensley 1986).

La aplicación del hidrogel en *Bouteloua pendula* (Zacate Banderilla), no siempre tiene buenos resultados, ya que reduce la masa total y también disminuye la cantidad de agua disponible en la planta (Tripepi *et al.*, 1991)

Habilidad del Hidrogel para Modificar las Características del Suelo

Los hidrogeles pueden modificar las propiedades del suelo, puesto que ellos absorben a menudo, muchas veces su peso en agua, especialmente en suelos secos donde las cantidades de agua son escasas. La potencialidad de los hidrogeles influye en la velocidad de infiltración, la densidad, la estructura del suelo, la compactación, la textura del suelo y la velocidad de evaporación, los cambios a las características del suelo pueden ser permanentes o temporales, dependiendo de las situaciones en las cuales se utilizan los hidrogeles (Teyel y El-Hady, 1981).

Cambios al Suelo y a la Matriz de los Medios

Usualmente, el objetivo de agregar los hidrogeles a la matriz del suelo es para aumentar la capacidad de retención de agua. La adición de los hidrogeles a un suelo arenoso cambió la relación agua – suelo, asemejándolo con el de un suelo arcilloso (Huttermann *et al*, 1999 y Johnson, 1984a).

Los suelos pueden formar las cortezas semi-hidrofóbicas en áreas con precipitaciones reducidas, motivo por lo cual, el agua se almacena en la superficie del suelo y entonces se infiltra en el perfil del suelo (Rubio *et al.*, 1989). El suelo forma una costra, cuando los agregados del suelo se reducen en partículas pequeñas, lo que disminuye significativamente la velocidad de infiltración (Shainberg y Levy, 1994). Cuando los agregados se forman por impacto del agua, las partículas son suspendidas y después crean una alta compactación en la arcilla. La compactación del suelo ocurrirá más a menudo en los suelos que son bajos en materia orgánica (Shainberg *et al.*, 1992).

Con el uso de los hidrogeles se ha observado que disminuye la erosión del suelo (Zhang y Miller, 1996, Lentz y Sojka, 1994, Levy *et al.*, 1995, Wallace y Wallace 1990). Su incorporación dentro de la superficie del suelo aumenta la capacidad de la infiltración, permitiendo una filtración más rápida de la precipitación, también incrementa la capacidad de retención de agua. Estos actúan como agentes para crear retenciones superficiales más grandes en el suelo que reducen la separación, y también reducen el escalamiento superficial puesto que el agua puede penetrar la superficie más fácilmente. Lentz y Sojka, 1994 observaron que la erosión del suelo disminuyó cuando los hidrogeles fueron agregados con la irrigación. De igual manera hicieron una lista de las diferentes maneras en que se pueden utilizar los hidrogeles para reducir la erosión incluyendo la incorporación en la superficie del suelo. La incorporación de poliacrilamida en el agua y la irrigación redujo pérdidas de erosión en el surco por un 94% y aumentó la velocidad de infiltración en un 15% (Lentz y Sojka, 1994). También observaron que al utilizar los hidrogeles en la superficie del suelo, aumentaron de tamaño los agregados del suelo, y que tienen el potencial de reducir la erosión provocado por el viento.

Los hidrogeles pueden reducir las pérdidas de los nutrientes en el suelo, sin embargo, (Lentz y Sojka, 1994) mencionan que tienen menos efecto en condiciones salinas. En

suelos altamente sódicos, estos disminuyen la erosión, pero cuando los niveles de salinidad son altos no tienen ningún efecto en características de la erosión de los suelos (Levy *et al.*, 1995).

Azzam, (1980) observaron que al aplicar la poliacrilamida disminuyó la densidad aparente de la arena de 1.616 a 1.585 g/cm³ y se redujo la densidad aparente del suelo arcilloso de 1.331 a 1.203 g/cm³. La densidad aparente de un suelo calcáreo, arenoso disminuyó un 6.8% cuando se aplicó al suelo 0.4% de hidrogel. Tiempo después, al degradarse el hidrogel se incrementó la densidad nuevamente en un 12%. El hidrogel provoca cambios en la densidad aparente, los cuales han sido estimados que disminuyen de un 10 a 15% cada año, dependiendo de las disminuciones de la capacidad del hidrogel (Al-Harbi *et al.* 1999).

Los hidrogeles, pueden reducir la salinidad del suelo, especialmente en suelos sódicos (Malik *et al.*, 1991). Ellos agregaron poliacrilamida dentro de grietas del suelo y encontraron que se incrementó la conductividad hídrica, crearon canales en los cuales el agua cargada de sal pudo lixiviar sobre el perfil del suelo, cuando la sal permanece en el suelo lo hace improductivo para el uso agrícola. Sin embargo, las concentraciones de sal pueden influenciar drásticamente el funcionamiento total de los hidrogeles en la matriz del suelo, especialmente cuando éstos se incorporan en la estructura del suelo (Helalia y Letey, 1988).

Acción del Hidrogel en la Fertilización y en las Sales del Suelo

Cuando los fertilizantes son aplicados con hidrogeles, desafortunadamente, la cantidad de agua se puede reducir cuando la solución se mezcla con los nutrientes (Bowman y Evans, 1991), (Woodhouse y Johnson, 1991b). En condiciones de laboratorio, la capacidad de retención del agua por los hidrogeles se determina usando agua desionizada (Woodhouse y Johnson, 1991b). A las soluciones que se les aplicó hidrogeles de poliacrilamida en los fertilizantes que contenían potasio y amonio (cationes monovalentes) redujeron la habilidad de absorción de agua en un 75%, y los que contenían calcio, magnesio, hierro, etc. (cationes divalentes); la redujeron en un 90% (Bowman *et al.*, 1990). El uso del agua desionizada invirtió la reacción hidrofóbica con los cationes monovalentes, pero invirtió parcialmente la reacción hidrofóbica con los cationes bivalentes únicamente (Bowman y Evans, 1991). En un estudio, el uso de calcio en forma de nitrato de calcio redujo

significativamente la cantidad de agua que un hidrogel de poliacrilamida que podría sostener (Bowman y Evans, 1991). Comparando los tres tipos de hidrogeles, todos mostraron reducción en absorción de agua, sin embargo el hidrogel natural fue el menos afectado cuando se realizó la mezcla entre fertilizantes e hidrogeles (Foster y Kever, 1991, Woodhouse y Johnson 1991b). Sin embargo, aun cuando las combinaciones entre fertilizantes e hidrogeles naturales (SCP) fueron los menos afectados, no conservaron tanta agua como el grupo de hidrogeles de poliacrilamida (Woodhouse y Jonson, 1991). En su experimento, el grupo de las poliacrilamidas (PAM) estabilizaron mejor la sal y por ello retuvieron mayor cantidad de agua.

En algunos casos, una formulación de fertilizante con hidrogel puede ser retenida por la matriz del suelo mientras que otras formulaciones no. Trabajando con amonio (NH_4^+) en tomate (*Lycopersicon esculentum*), se conservaron los niveles crecientes comparados con el control sin hidrogel pero cuando el nitrato (NO_3^-) fue adherido, la cantidad lixiviada era similar para todos los tratamientos. Dos formulas diferentes podrían modificar las cantidades iónicas, resultando diferencia en solubilidad (Henderson y Hensley, 1986), estos mismos autores también obtuvieron resultados similares con los tipos de nitrógeno lixiviado. (Magalhaese *et al.*, 1987) encontraron que los polímeros conservaron más concentraciones de cationes cuando fueron completamente deshidratados y después rehidratados, como si nunca hubieran sido deshidratados, pudieron sostener menos agua antes de la deshidratación. Otra característica que presentan los hidrogeles es que tienen un pH generalmente alto (alcalino). Con un pH alto algunas plantas crecen lentamente, Amador y Stewart, (1987) agregaron un extracto de alga marina al hidrogel, lo que redujo significativamente el pH. Sin embargo al agregar el extracto de alga marina el potencial de agua del hidrogel disminuyó, resultando una germinación inadecuada de la semilla y el crecimiento de la planta en el semillero. Specht y Harvey-Jones (2000) mencionaron los problemas con la sal y el fertilizante, pueden ser evitados a menudo, con prácticas culturales normales de fertilización, que ocurre a menudo después del establecimiento inicial de la planta. La incorporación de los hidrogeles dentro de suelos gruesos y arenosos ha tenido mejores resultados, posiblemente por que existen menos cationes en estos suelos (Fry y Butler, 1989, Woodhouse y Jonson, 1991b).

Los hidrogeles de poliacrilamida (PAM) tienen un mayor potencial de uso, ya que tienen una mayor capacidad de retención en condiciones salinas y que pueden ser usados en climas áridos y suelos salinos (Woodhouse y Jonson, 1991).

Aun cuando la mayor parte de los beneficios positivos de los hidrogeles han sido mayores con el uso de hidrogeles de poliacrilamidas, se continúan haciendo trabajos con polisacáridos ya que en un futuro pueden ser mejores que los hidrogeles sintéticos Gardiner *et al.* (1999).

Permanencia en el Suelo

Una de las principales preocupaciones que rodean el uso del hidrogel es cuánto tiempo duran en el suelo cuando se aplica una sola vez. Scow y Alexander (1992) observaron que existe una diferencia en la biodegradación del hidrogel con la información que trae la etiqueta del producto y su uso real, realizaron ensayos en laboratorio, en los cuales se determinaron que los índices totales de biodegradación de las moléculas hidrofílicas orgánicas variaron con el tamaño del agregado del suelo y con la concentración total de las moléculas orgánicas. Ohkawa y colaboradores (1998) indicaron que varios tipos de hongos y bacterias del suelo degradan fácilmente los hidrogeles en condiciones de laboratorio. Las Poliacrilamidas son más usadas en situaciones agrícolas puesto que el porcentaje de degradación generalmente es mucho más lenta que la mayoría de los hidrogeles naturales aun cuando ambos pueden tener las mismas respuestas iniciales en el suelo (Aly y Letey, 1990).

Letey (1994) encontró que los hidrogeles que fueron desecados totalmente, en el suelo llegaron a ser menos eficaces, también observó que es mucho más fácil adherir hidrogeles catiónicos al suelo arcilloso que los polímeros aniónicos puesto que los cationes bivalentes actúan como puentes del suelo al polímero y crea un enlace permanente.

La permanencia de los polímeros se puede ver afectada por la práctica de irrigación. (Terry y Nelson, 1986). La permanencia y la eficacia también se reducen, cuando los hidrogeles son colocados muy profundos en el suelo, debido a los cationes que existen en el suelo (Nadler *et al.*, 1994).

Los hidrogeles potencialmente tienen efectos positivos y negativos en la matriz del suelo. En el suelo aumentan el tamaño agregado, reducen la erosión del suelo, reducen los efectos

negativos de las pérdidas de nutrientes. También permiten el almacenaje de agua y la filtración de agua en el suelo. Las condiciones salinas reducen la eficacia total de hidrogeles cuando las cantidades excesivas de sales están presentes en el suelo, y su capacidad también disminuye cuando son incorporados profundamente en la estructura del suelo. En última instancia, las estructuras del suelo y las cualidades químicas se deben probar para determinar el funcionamiento total de los hidrogeles en el suelo especificado.

Respuesta Biológica en la Matriz del Suelo Incorporando Hidrogeles

Los organismos tales como plantas, micorrizas, bacterias, y hongos se ha observado que tienden a responder a las adiciones de los hidrogeles a los medios del suelo. Los hidrogeles tienen la capacidad de retener productos químicos a las plantas - incluyendo las hormonas de crecimiento, y los fertilizantes; la combinación de la cual puede potencialmente ayudar en la vegetación (Van Cottem, 1999). Los Hidrogeles también pueden servir como sustrato para las inoculaciones de las micorrizas.

Respuesta Bacteriana en el Suelo con Hidrogeles

Junto con las plantas y micorrizas, las bacterias pueden también ser afectadas por las adiciones de hidrogeles a la matriz del suelo. Grula y colaboradores (1994) realizaron experimentos en laboratorio usando hidrogeles de poliacrilamida, y el crecimiento de las bacterias (*Pseudomonas* sp.) fue estimulado.

La estimulación del crecimiento fue atribuido a la adición de niveles de nitrógeno de amonio del grupo amida, que se encuentra sobre la cadena del polímero (Grula *et al.*, 1994), (Grula y Sewell 1981). Estos últimos observaron que la respuesta bacteriana en el suelo no fue igual ya que en el laboratorio se utilizaron concentraciones del polímero más altas que las que se usaban normalmente en campo, también notaron que si ocurrió el aumento en las cantidades de bacterias, podría potencialmente cambiar el pH de la matriz del suelo a través de los niveles altos de las reacciones de oxidación – reducción, realizados por los microbios. Los microbios que fijan el nitrógeno tales como *Frankia* sp. pueden también beneficiar los usos del hidrogel (Kohls *et al.*, 1999).

Las plantas similares a leguminosas: como (*Almas glutinosa* y *Casuarina equisetifolia*) presentan la característica de contener nódulos en las raíces y tener microbios fijadores de nitrógeno (Kohls *et al.*, 1999). Cuando las raíces de estas plantas fueron tratados con un

hidrogel conteniendo *Frankia* sp, el peso seco total de los nódulos aumento de dos a tres veces en un periodo de 140 días, comparándose con raíces tratadas con *Frankia* sp. (Kohls *et al.*, 1999). El incremento de los nódulos de las raíces es importante para *A. glutinosa* y *C. equisetifolia* puesto que son utilizados a menudo para las recuperaciones de donde los nutrientes son muy bajos (Kohls *et al.*, 1999). Azzam (1980) encontró que los hidrogeles incrementan la población de bacterias fijadoras de nitrógeno (*Azotobacter*, *Azospirilla*, y *Clostridium*), pero a un grado limitado.

Los microorganismos suspendidos y/o sostenidos por PAM y PVA pueden ser utilizados en la bioremediación para retener bacterias en un lugar que no emigren fuera del área encontraron también que los niveles de metales pesados cambio con las reacciones de las bacterias en el suelo por oxidación - reducción (haciendo el metal soluble), cambios en pH y bioacumulación. El hidrogel puede ayudar a que las bacterias se estabilicen y quitar los metales pesados como el plomo, cadmio, cromo y cobre (Degiorgi *et al.*, 2002).

Las diversas respuestas en la actividad microbiana ocurren cuando son aplicados los hidrogeles.

Steinberger y colaboradores (1993) probaron diferentes tipos de PAM sobre los microbios y midieron la respuesta para determinar el número de respuestas positivas o negativas. Ellos encontraron que todas las formulaciones del PAM que utilizaron, presentaron diversas respuestas para cada formulación.

Los hidrogeles pueden ayudar en la germinación, en establecimiento de semilleros, transpiración de las plantas, disponibilidad del agua y la inoculación de la raíz con micorrizas y bacterias. El uso del hidrogel ayudan al buen funcionamiento la planta, sin embargo debe existir una relación general en la especie de planta, condiciones ambientales, tipo de suelo, concentración de sales, etc. (Callaghan *et al.*, 1989).

Rendimiento del Hidrogel a Nivel Productividad

El hidrogel eleva significativamente la productividad en los suelos arenosos. En ensayos realizados con hidrogeles y distintas cantidades de agua en el riego, se ha observado que la máxima producción se alcanzó cuando el riego se redujo al 50 %. En condiciones de riego normal, las producciones se incrementan en un 182 y un 200 % respecto a las plantas no tratadas (<http://demexcorp.com/hidrogel.html>).

Nissen. (2004), Estudio el efecto de diferentes tratamientos hídricos sobre la producción de lechuga. Utilizó un acondicionador de suelo (hidrogel), aplicado a la raíz de la plántula al momento del trasplante, al suelo previo al trasplante o a la raíz-suelo en forma conjunta, comparando estos tratamientos con trasplante a raíz desnuda. También se realizaron estudios (con y sin riego), dando origen en total a ocho tratamientos. Los parámetros analizados fueron: porcentaje de plantas establecidas, diámetro de la planta, número de hojas/planta, peso de la planta completa, peso aéreo, peso radical y días desde el trasplante a la cosecha. Todas las mediciones se realizaron al momento de la cosecha. Los resultados con mayores valores se obtuvieron cuando se aplicó hidrogel al suelo y en forma conjunta a la raíz-suelo.

ESTADO ACTUAL DEL CONOCIMIENTO

El desarrollo científico de los últimos años permite incorporar tecnología de punta en el campo para superar la dependencia de las condiciones climáticas, con el objeto de obtener una buena cosecha y reducir los costos de producción. Las estadísticas señalan que en la actualidad el 80 por ciento del agua de la nación es utilizada con fines de riego agrícola; sin embargo, apenas se aprovecha la mitad de estos recursos y lo demás se desperdicia en su flujo natural hacia los mantos freáticos o la evaporación.

Por lo que, desde hace 20 años se están realizando ensayos que demuestran que el uso extensivo en la agricultura de los hidrogeles mejoran la capacidad de retención del agua en el suelo, favoreciendo por tanto el desarrollo de las plantas. Al mezclarse el hidrogel con el suelo se consigue, por un lado, aprovechar mejor el agua de lluvia o riego al perderse menor cantidad de agua por filtración, y por otro lado, también se consigue disminuir la evaporación de la misma. Estos dos factores son suficientes para mejorar la actividad biológica y aumentar la producción del suelo.

Además, la utilización de estos hidrogeles también produce una mejora de la estructura del suelo y de la aereación del mismo. Así, su uso permitiría por ejemplo, la recuperación de zonas semiáridas o terrenos de cultivos abandonados y poco fértiles cuando se emplea de forma extensiva. También se han utilizado, mezclándolos con abonos, en campañas de reforestación, donde proporcionan a los plantones 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 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 dinero que ello supone.

Entre las hortalizas que actualmente tienen el mayor consumo de agua se destaca la lechuga, que es muy sensible a déficit hídrico y a variaciones de temperatura, por lo cual existe un cierto riesgo en su producción. Sin embargo, la demanda de esta hortaliza sigue creciendo. Para satisfacer su demanda es necesario crear y aplicar nuevas técnicas que favorezcan su desarrollo, particularmente para un mejor abastecimiento de agua a las plantas, para lo cual se propone el uso de hidrogeles. El uso de hidrogel humectado como acondicionador de las raíces, combinado con una aplicación de este producto al suelo, más

el uso de riego, mejoraría las condiciones generales de trasplante de esta hortaliza, evitando su deshidratación (Nissen, 2004).

Algunos polímeros como la lignina, el alginato, el quitosano y los hidrogeles sintéticos han sido ampliamente utilizados para dosificar de forma controlada principios activos. En productos farmacéuticos se han utilizado los hidrogeles de alcohol polivinílico para liberar controladamente atenolol, heparina e indometacina entre otros. Asimismo, otras formulaciones similares han sido utilizadas para la liberación controlada de plaguicidas.

En estos sistemas, el agente activo se encuentra contenido dentro de una estructura polimérica, el hidrogel evita la dispersión descontrolada del plaguicida y mantiene la concentración del mismo dentro de los niveles de efectividad. Asimismo, decrecen las pérdidas del material durante su aplicación, se emplean cantidades menores del plaguicida y se reduce el número de aplicaciones (Rojas *et al.*, 2004).

Como hemos visto, las investigaciones que se han venido desarrollando en los últimos años sobre los polímeros superabsorbentes como los hidrogeles, han dado como resultado nuevos productos que cubren amplias áreas de aplicación. La continuidad de las investigaciones permitirá en un futuro que podamos disfrutar de nuevas y diversas aplicaciones de estos versátiles compuestos.

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 superabsorbentes 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.

Además, estos polímeros también están siendo introducidos en otras áreas como la protección medioambiental, ya que pueden utilizarse para controlar el escape y la dispersión de productos tóxicos. Este tipo de técnicas se han aplicado con éxito para el control de la dispersión de muchas sustancias químicas, incluyendo ácidos y bases fuertes,

y se han desarrollado también polímeros capaces de absorber aceites y otros productos derivados del petróleo.

Entre las nuevas aplicaciones industriales de éstos polímeros en el campo de la ingeniería eléctrica y de telecomunicaciones, está 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 cortocircuitos o cortes en las telecomunicaciones.

En la industria alimentaría se están utilizando bandejas de envasado que incluyen polímeros en su composición, las 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 período de tiempo en los productos frescos perecederos como carnes y pescados que presentan muchas veces problemas de transporte y empaquetado.

Se han usado para la preparación de nieve artificial en unas instalaciones cerradas para la práctica del esquí, cercanas a Tokio. La nieve se prepara hinchando el polímero con una cantidad de agua 100 veces su peso y se congela *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 de investigación, es el que se deriva 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.

ÁREAS DE OPORTUNIDAD

Existen muchas áreas en las cuales es posible la aplicación de los hidrogeles, pero una de las menos aprovechadas y con muchísimo potencial es sin duda en la agricultura. Hasta el momento se han realizado numerosas investigaciones en cultivos de alto valor agregado y se han obtenido resultados muy favorables, por lo que es posible en un futuro reciente su uso cotidiano y en gran escala para lograr muchas de las mejoras mencionadas en la presente revisión. Algunas de las cuales se mencionan a continuación.

Con el método tradicional de siembra, la mayoría de los nutrientes y abonos que acompañan a la planta se filtran directamente al subsuelo y lo contaminan; a causa de esta pérdida, hay que agregar grandes cantidades de insumos, lo que eleva el costo de producción. Con el uso del hidrogel se evitan gastos y éste se torna autofinanciable y su vida útil puede ser muy amplia si se le aplica el mantenimiento adecuado.

Las primeras investigaciones sobre estos productos se llevaron a cabo en Israel, donde ya es posible sembrar en el desierto gracias a este sistema que permite el ahorro de agua, y una gran capacidad de absorción de los hidrogeles evitarán la pérdida de agua tanto por percolación como por evaporación que se producen en el riego. Además no hacen falta los riegos continuos por la retención de agua, reduciendo estos hasta un 75%, por lo tanto tenemos un ahorro de consumo eléctrico derivada de la reducción del número de riegos, llevando consigo la reducción directa y proporcional del consumo de electricidad.

Alarga la vida del sistema de riego, puesto que la reducción del número de riegos alargará la vida de todo el sistema de irrigación haciendo más rentable, tanto por la ampliación de su periodo de vida útil, como la reducción de sus gastos de mantenimiento, ya que una menor utilización de dicho sistema disminuirá considerablemente el riesgo de averías.

La presencia de los hidrogeles favorece la germinación de las plantas en comparación con el suelo en estado natural, su capacidad de absorber y retener agua tiene un efecto positivo sobre el crecimiento de las plantas.

El ahorro de abonos, las necesidades de abonado se reducirán en un 40 %, ya que al reducirse las necesidades de riego, se reducirán las pérdidas provocadas por la disolución de los nutrientes en agua y su posterior pérdida por percolación.

Mejoramiento de tierra o sustratos en el vivero, mejoramiento de tierra o sustratos para bandejas de plantación.

Actualmente en el estado de Jalisco el hidrogel es aprovechado por la asociación de productores de tequila en sus viveros; aunado a esto, se han hecho pruebas en campos de reforestación y varios sembradíos de maíz donde las cosechas se incrementaron en un 30%.

Otra área de oportunidad es la posibilidad de que en México se desarrollen nuevos materiales para disminuir el costo de los mismos y para obtener materiales a la medida.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Según los resultados de los trabajos revisados y tomando en cuenta las condiciones bajo las cuales se realizaron, es posible concluir lo siguiente:

El consumo de agua es reducido al aplicar hidrogel, los rendimientos son mayores y los costos de producción bajan considerablemente. Al realizar estas aplicaciones tenemos mayores oportunidades de producir en terrenos poco fértiles. Los riegos son menos frecuentes ya que los hidrogeles retienen el agua y las plantas la extraen en el momento más oportuno sin necesidad de aplicar mayor número de riegos.

La fertilización es más eficiente al evitarse la lixiviación de los fertilizantes, ya que el hidrogel se encarga de retenerlos y además se encuentran disponibles para ser aprovechados por la planta.

Para cualquier cultivo, lo primordial es la humedad disponible y en este caso el hidrogel presenta esta ventaja, por lo tanto se va a tener un mayor rendimiento, los frutos son de mayor calidad al no presentar la planta ningún estrés; por lo anterior los costos de producción bajan considerablemente al hacer estas aplicaciones.

Se sugiere que se realicen más investigaciones acerca de la aplicación de los hidrogeles en la agricultura especialmente en nuestro país, ya que la mayoría de los trabajos realizados actualmente son en Argentina, Venezuela, Colombia, Portugal etc., dando a conocer el resultado de los trabajos que se realicen para poder aprovecharlos en beneficio del campo mexicano, de igual manera se sugiere que se realicen estudios acerca de los hidrogeles con características especiales para que sean aprovechados al máximo sus propiedades para cada cultivo y así los productores se decidan aplicar los hidrogeles a sus cultivos, ya que es una muy buena opción especialmente para lugares donde llueve muy poco y las sequías son muy persistentes.

Realizar investigaciones donde el hidrogel pueda utilizarse como sustrato, o mezclarlo con fibra de coco para un ahorro de agua y nutrientes.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Akhterl, 2004. Effects of hydrogel amendment on water storage of sandy loam and loam soils and seedling growth of barley, wheat and chickpea, *Nuclear Institute for Agriculture and Biology, Faisalabad, Pakistan*, **10**: 463–469.
- Al-Harbi, A. R., A. M. Al-Omran, A. A. Shalalay and M. I. Choudhary. 1999. Efficacy of a hydrophilic polymer declines with time in greenhouse experiments. *HortScience*, **34**(2): 223-224.
- Aly, S. M. and J. Letey. 1989. The effects of two polymers and water qualities on dry cohesive strength of three soils. *Soil Science Society of America Journal*, **53**: 255-259.
- Aly, S. M. and J. Letey. 1990. Physical properties of sodium-treated soil as affected by two polymers. *Soil Science Society of America Journal*, **54**: 501-504.
- Amador, A. M. and K. K. Stewart. 1987. Osmotic potential and pH of fluid drilling gels as influenced by moisture loss and incorporation of growth regulators. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, **112**(1): 26-28.
- Azzam, R. A. I. 1980. Agricultural polymers. Polyacrylamide preparation, application, and prospects in soil conditioning. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, **11**(8): 767-834.
- Azevedo, T. L. F. 2000. Avaliação da eficiência do polímero agrícola de poliacrilamida no fornecimento de água para o cafeeiro (*Coffea arabica* L) cv. Tupi. Maringá, Universidade Estadual de Maringá. 38.
- Barvenik, F. W. 1994. Polyacrylamide characteristics related to soil applications. *Soil Science*, **158**(4): 235-243.
- Baxter, L. and L. Waters. 1986a Effect of a hydrophilic polymer seed coating on the field performance of sweet corn and cowpea. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, **111**(1): 31-34.
- Baxter, L. and L. Waters, Jr. 1986b Effect of a hydrophilic polymer seed coating on the imbibition, respiration, and germination of sweet corn at four matric potentials. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, **111**(4): 517-520.

- Baxter, L. and L. Waters, Jr. 1987. Field and laboratory response of sweet corn and cowpea to a hydrophilic polymer seed coating. *Acta Horticulturae*, **198**: 31-35.
- Bilderback, T. E. 1987. Moisture extender and wetting agent effects on two drought-sensitive nursery crops. *HortScience*, **22**(5): 1049.
- Billmeyer, F. W. 1962. Text book of polymer Science, John Wiley and Sons, New York.
- Boatright, J. L., D. E. Balint, W. A. Mackay, and J. M. Zajicek. 1997. Incorporation of a hydrophilic polymer into annual landscape beds. *Journal of Environmental Horticulture*, **15**(1): 37-40.
- Bowman, D. C., R. Y. Evans, and J. L. Paul. 1990. Fertilizer salts reduce hydration of polyacrylamide gels and affect physical properties of gel-amended container media. *American Society of Horticultural Sciences Journal*, **115**:382-386.
- Bowman, D. C. and R. Y. Evans. 1991. Calcium inhibition of polyacrylamide gel hydration is partially reversible by potassium. *HortScience*, **26**(8): 1063-1065.
- Bradford, K. J. and S. F. Yang. 1981. Physiological responses of plants to waterlogging. *HortScience*, **16**(1): 25-30.
- Bres, W. and Weston 1993. Influence of gel additives on nitrate, ammonium, and water retention and tomato growth in a soil less medium. *Horticulture Science*, **28** (10) : 1005-1007.
- Carhuapoma, B. W. y J. Santiago. 2005. Caracterización de hidrogeles de *quitosano-alcohol* polivinílico obtenidos por radiación gamma. *Revista Iberoamericana de Polímeros*, **6**(4).
- Callaghan, T. V., H. Abdelnour, and D.K. Lindley. 1988. The environmental crisis in the Sudan: the effect of water-absorbing synthetic polymers on tree germination and early survival. *Journal of Arid Environments*, **14**: 301-317.
- Callaghan, T. V., D. K. Lindley, O. M. Ali, H. Abd El Nour, and P. J. Bacon. 1989. The effect of water-absorbing synthetic polymers on the stomatal conductance, growth and survival of transplanted *Eucalyptus microtheca* seedlings in the Sudan. *Journal of Applied Ecology* **26**: 663-672.
- Choi, H. and M Kunioka. 1995. *Radiation Physics Chemical*, 46/2, 175-179 (1995).

- Cook, D. F. and S. D. Nelson. 1986. Effect of polyacrylamide on seedling emergence in crust forming soils. *Soil Science*, **141**(5): 328-333.
- Curitiba, D. M. 2005. Efeito da adição do polímero hidrorretentor na eficiência da adubação nitrogenada no rescimento de *Brachiaria decumbens* cv. basilisk, em dois diferentes substratos. Departamento de Solos e Engenharia Agrícola do setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná, **28**: 201-208.
- Davies, F. T., Jr., Y. Castro-Jimenez, y S. A. Duray. 1987. Mycorrhizae, soil amendments, water relations and growth of *Rosa multiflora* under reduced irrigation regimes. *Scientia Horticulturae*, **33**: 261-267.
- Degiorgi, C. F., R. A. Pizarro, E. E. Smolko, S. Lora, y M. Carenza. 2002. Hydrogels for immobilization of bacteria used in the treatment of metal-contaminated wastes. *Radiation Physics and Chemistry*, **63**: 109-113.
- Dusek, K. and D. Patterson, 1968. *Journal Polymers Science Par*, **26**: 1209.
- El Hady, O. A. M. Tayel, 1981. Super gel as a soil conditioner. II: Its effects on plant growth, enzyme activity, water use efficiency and nutrient uptake. *Acta Horticulturae*, **119**: 257-265.
- Finch-Savage, W. E. and C. J. Cox. 1982. Effects of adding plant nutrients to the gel carrier used for fluid drilling germinating lettuce and onion seeds. *Annals of Applied Biology*, **102**: 213-217.
- Foster, W. J. and G. J. Keever. 1991. Water absorption of hydrophilic polymers (hydrogels) reduced by media amendments. *Journal of Environmental Horticulture*, **8**(3): 113-114.
- Fry, J. D. and J. D. Butler. 1989. Water management during tall fescue establishment. *HortScience*, **24**(1): 79-81.
- Gardiner, D., P. Felker, y T. Carr. 1999. Cactus extract increases water infiltration rates in two soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, **30**(11&12): 1707-1712.
- Grola, M. and G. Sewell. 1981. Polyacrylamide stimulation of *Desulfovibrio* growth and sulfate reduction. *Developments in Industrial Microbiology*, **23**: 419-424.

- Gula, M. M., M. Huang, and G. Sewell. 1994. Interactions of certain polyacrylamides with soil bacteria. *Soil Science*, **158**(4): 291-300.
- Helalia, A. and J. Letey. 1988. Cationic polymer effects on infiltration rates with a rainfall simulator. *Soil Science Society of America Journal*, **52**: 247-250.
- Henderson, J. C. y D. L. Hensley. 1986. Efficacy of a hydrophilic gel as a transplant aid. *HortScience*, **21**(4): 991-992.
- Hickey, S. A. and N. A. Peppas. 1995. *Journals Membrane Science*, 107: 229-237.
- Hirokawa, Y, and Tanaka, T. 1984. *Microbial Adhesion and Aggregation*, Springer, Berlin Heidelberg, New Cork.
- Hung, L. L., D. M. O'Keefe, and D. M. Sylvia. 1991. Use of hydrogel as a sticking agent and carrier for vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi. *Mycorrhizal Research*, **95**(4): 427-429.
- Huttermann, A., M. Zommodi, and K. Reise. 1999. Addition of hydrogels to soil for prolonging the survival of *Pinus halepensis* seedlings subjected to drought. *Soil and Tillage Research*, **50**: 295-304.
- Ingram, D. L. and T. H. Yeager. 1987. Effects of irrigation frequency and a water-absorbing polymer amendment on *Ligustrum* growth and moisture retention by a container medium. *Journal of Environmental Horticulture*, **5**(1): 19-21.
- Jhurry, D. 1997. Agricultural polymers. University of Mauritius food and agricultural research council, *réduit, Mauritius*, **4**: 109-113.
- Johnson, M. S. and R. T. Leah. 1990. Effects of superabsorbent polyacrylamides on efficiency of water use by crop seedlings. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, **52**: 431-434.
- Johnson, M. S. 1984a. The effects of gel-forming polyacrylamides on moisture storage in sandy soils. *journal. Science. Food Agric*, **35**: 1063-1066.
- Johnson, M. S. 1984b. Effects of soluble salts on water absorption by gel-forming soil conditioners. *J. Sci. Food Agric*, **35** : 1196-1200.
- Johnson, M. S. and C. J. Veltkamp. 1985. Structure and functioning of water-storage agricultural polyacrylimides. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, **36**: 789-793.

- Katime, A. 2004. Hidrogeles inteligentes. Grupo de Nuevos Materiales. Universidad del País Vasco (EHU/UPV). Facultad de Ciencias. Departamento de Química Física. Campus de Leioa, 1-42.
- Kohls, S. J., D. D. Baker, D. A. Kremer, and J. O. Dawson. 1999. Water-retentive polymers increase nodulation of actinorhizal plants inoculated with *Frankia*. *Plant and Soil*, **214**: 105-115.
- Klempner, D. 1990 Concise Encyclopedia of Polymer Science and Engineering John & wileySons, New York.
- Lárez, V. 2006. Quitina y quitosano: materiales del pasado para el presente y el futuro Grupo de Polímeros, Departamento de Química Facultad de Ciencias, Universidad de Los Andes Mérida 5101, Venezuela. *Avances en Química*, **1**(2): 15-21).
- Lentz, R. D. and R. E. Sojka. 1994. Field results using polyacrylamide to manage furrow erosion and infiltration. *Soil Science*, **158**(4): 274-282.
- Levy, G. J., J. Levin, and I. Shainberg. 1995. Polymer effects on runoff and soil erosion from sodic soils. *Irrigation Science*, **16**: 9-14.
- Letey, J. 1994. Adsorption and desorption of polymers in soil. *Soil Science*, **158**(4): 244-248.
- Llmain, F. Tanaka, T. and E. Kokufuta. 1991. *Nature*, 349: 400.
- Magalhaes, G. E. W., F. C. Rodrigues, F. L. I. M. Silva, and A.N. Ferreira Rocha. 1987. Plant growth and nutrient uptake in hydrophilic gel treated soil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, **18**(12): 1469-1478.
- Malik, M., C. Amrhein, and J. Letey. 1991. Polyacrylamide to improve water flow and salt removal in a high shrink-swell soil. *Soil Science Society of America Journal*, **55**: 1664-1667.
- Malik, M. and J. Letey. 1991. Adsorption of polyacrylamide and polysaccharide polymers in soil materials. *Soil Science Society of America Journal*, **55**: 380-383.
- Mikkelsen, R.L. 1994. Using hydrophilic polymers to control nutrient release. *Fertilizer Research*, **38**: 53-59.

- Mikkelsen, R. L. A. D. Behel, and H. M. Williams, 1993. Addition of gel-forming hydrophilic polymers to nitrogen fertilizer solutions. *Fertilizer Research*, **36**: 55-61.
- Mikkelsen, R. L., A. D. Behel, and H. M. Williams, 1995. Using hydrophilic polymers to improve uptake of manganese fertilizers by soybeans. *Fertilizer Research*, **41**, 87-92.
- Mogensen, V. O. 1980. Drought sensitivity at various stages of barley in relation to relative evapotranspiration and water stress. *Agronomy*, **72**: 1033-1038.
- McGrady, J. J. and D. J. Cotter. 1987. Preplant seed treatment effects on growth and yield of chile pepper. *HortScience*, **22**(3): 435-437.
- Nadler, A., M. Magaritz, y L. Leib. 1994. PAM application techniques and mobility in soil. *Soil Science*, **158**(4): 249-254.
- Nissen, y J. 1994. Uso de hidrogeles en la producción de frambuesas (*Rubus idaeus* L.) del Sur de Chile. *Agro Sur* **22**(2): 160 - 164.
- Nissen, y J. Hoffmann. 1998. Evaluación de cuatro sistemas de manejo hídrico sobre la producción de frutilla (*Fragaria x ananassa* D.). *Agro Sur*, **26**(2): 1-11.
- Nissen, J. 2004. Uso de poliacrilamidas y el riego en el manejo hídrico de lechugas (*lactuca sativa* L.) Universidad Austral de Chile, Instituto de Ingeniería Agraria y Suelos, Valdivia. **27** (2): 267-263.
- Odell, G. B. and D. J. Cantliffe. 1987. Stand establishment of direct-seeded tomatoes under heat stress. *Acta Horticulturae*, **198**: 23-30.
- Odell, G. B; D. J. Cantliffe; H. H. Bryan, and P. J. Stoffella. 1992. Stand establishment of fresh-market tomatoes sown at high temperatures. *HortScience*, **27**(7): 793-795.
- Pineda, N. A. Baresch, L, y C. A. Fajardo 2003. Hidrogeles de acrilamida en plantas de Chile (*capsicum annum*.) feria de química.
- Rojas, O., O. Sibaja, M. Ruepert, C. Vega-Baudrit. 2004. Liberación controlada de Plaguicidas Iberoamericana de Polímeros, **5**(3).
- Rojas B., M., Ramírez, y R., Aguilera. 2006. Los hidrogeles poliméricos como potenciales reservorios de agua y su aplicación en la germinación de semillas de tomate en diferentes tipos de suelo. Universidad de Oriente, Instituto de Investigaciones en

- Biomedicina y Ciencias Aplicadas (IIBCA-UDO), Cerro del Medio, *revista Iberoamericana de polímeros*, 7(3): 199-210.
- Roule, D. A. 1992. The complexities of water management. *Golf Course Management*, 1: 8-10.
- Rubio, H. O., M. K. Wood, M. Cardenas, and B.A. Buchanan. 1989. Effect of polyacrylamide on seedling emergence of three grass species. *Soil Science*, 148(5): 355-360.
- Sabota, C. C. Beyl, and J. Biedermann. 1987. Acceleration of sweet corn germination at low temperatures with Terra-Sorb or water presoaks. *HortScience*, 22(3): 431-434.
- Sáez, V. H. y L. Sanz. 2003. *Revista Iberoamericana de polímeros*, 4/1: 21-91.
- Save, R., M. Pery, O. Marfa, and L. Serrano. 1995. The effect of hydrophilic polymer on plant and water status and survival of pine seedlings. *HortTechnology*, 5(2): 141-143.
- Sayed, H., R. C. Kirkwood, N. B. Graham, 1991. The effects of a hydrogel polymer on the growth of certain horticultural crops under saline conditions. *Journal of Experimental Botany*, 42: 240, 891-899.
- Sayed., K. M. and M. Alexander. 1992. Effect of diffusion on the kinetics of biodegradation: experimental results with synthetic aggregates. *Soil Science Society of America Journal*, 56: 128-134.
- Shainberg, I., G. J. Levy, P. Rengasamy, and H. Frenkel. 1992. Aggregate stability and seal formation as affected by drops' impact energy and soil amendments. *Soil Science*, 154(2): 113-119.
- Shainberg, I. and G. J. Levy. 1994. Organic polymers and soil sealing in cultivated soils. *Soil Science*, 158(4): 267-273.
- Specht, A. and J. Harvey-Jones. 2000. Improving water delivery to the roots of recently transplanted seedling trees: the use of hydrogels to reduce leaf loss and hasten root establishment. *Forest Research*, 1: 117-123.
- Swietlik, D. 1989. Effect of soil amendment with Viterra hydrogel on establishment of newly planted grapefruit trees CV Ruby Red. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 20(15y16): 1697-1705.

- Scow, K. M. and M. Alexander. 1992. Effect of diffusion on the kinetics of biodegradation: experimental results with synthetic aggregates. *Soil Science Society of America Journal*, **56**: 128-134.
- Steinberger, Y., S. Sarig, A. Nadler, and G. Barnes. 1993. The effect of synthetic soil conditioners on microbial biomass. *Arid Soil Research and Rehabilitation*, **7**: 303-306.
- Tanaka, D. J. Fillmore, S-T Sun, I. Nishio, G. Swislow and A. Shah, *Physical* 1980, *Review Letter*, **45**: 1636.
- Taylor A. M., Halfacre, y H .M. Vines. 1986. Influence of an antitranspirant and a hydrogel net photosynthesis and water loss on cineraria during water stress. *HortScience*, **20**(3): 386-388.
- Terry, R. E. and S. D. Nelson. 1986. Effects of polyacrylamide and irrigation method on soil physical properties. *Soil Science*, **141**(5): 317-320.
- Teyel, M. and O. A. El-Hady. 1981. Super gel as a soil conditioner. *Acta Horticulturae*, **119**: 247-256.
- Tittonell, P.A. 1999. Calidad de plantacion del pimiento (*Capsicum annum* L.) en función del volumen disponible para la exploración radicular y la porosidad del sustrato. Actas del XXII CONGRESO ARGENTINO DE HORTICULTURA, San Miguel de Tucumán, Argentina. I.S.B.N. 987-978.
- Tripepe, R. R., M. W. George, R. R. Dumroese, and D. L. Wenny. 1991. Birch seedling response to irrigation frequency and a hydrophilic polymer amendment in a container medium. *Journal of Environmental Horticulture*, **9**(3): 119-123.
- Van Cotthem, W. 1999. Addressing desertification: combination of traditional methods and new technologies for sustainable development. UNESCO International Hydrological Programme. CSIR Conference Centre – Pretoria, South Africa.
- Wallace, A. 1986. Efectos de los acondicionadores del suelo en la aparición y el crecimiento de las plantas de semillero del tomate, del algodón y de la lechuga. *Ciencia de suelo*, **141** (5): 313–316.
- Wallace, A. and A. M. Abouzamzam. 1986. Interactions of soil conditioner with other limiting factors to achieve high crop yields. *Soil Science*, **141**(5): 343-345.

- Wallace, A. and G. A. Wallace. 1990. Control of soil erosion by polymeric soil conditioners. *Soil Science*, **141**(5): 363-367.
- Wang, Y. and L. L. Gregg. 1999. Hydrophilic polymers – their response to soil amendments and effect on properties of a soilless potting mix. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, **115**(6): 943-948.
- Wang, Y. and L. L. Gregg. 1990. Medium and hydrogel affect production and wilting of tropical ornamental plants. *HortScience* **24**(6): 941-944.
- Wang, Y. and C. A. Boogher. 1987. Effect of a medium-incorporated hydrogel on plant growth and water use of two foliage species. *Journal of Environmental Horticulture*, **5**(3): 125-127.
- Woodhouse, J. M. and M. S. Johnson. 1991a. The effect of gel-forming polymers on seed germination and establishment. *Journal of Arid Environments*, **20**: 375-380.
- Woodhouse, J. M. and M. S. Johnson. 1991. Effects of soluble salts and fertilizers on water storage by gelforming soils conditioners. *Acta Horticulturae*, **294**: 261-269.
- Zhang, X. C. and W. P. Miller. 1996. Polyacrylamide effect on infiltration and erosion in furrows. *Soil Science Society of America Journal*, **60**: 866-872.

Revisiones en Internet

<http://comsoc.udg.mx/gaceta/paginas/125/8-125.pdf> . Citada el 20 de mayo de 2007.

<http://demexcorp.com/hidrogel.html> . Citada el 10 de marzo de 2007.

http://wwwprof.uniandes.edu.co/~infquimi/VI_feria/id63.htm. Citada el 23 de mayo de 2007.