

Introducción al curso

Hidroponía aplicada a producción sostenible de forrajes
Avanzado



Objetivos específicos

Reconocer la evolución histórica y las principales modalidades de los cultivos hidropónicos con énfasis en la producción de forraje.

Describir los métodos de producción empleados en diferentes sistemas hidropónicos aplicables al forraje.

Analizar las técnicas de nutrición y el manejo nutricional que favorecen la sostenibilidad en la producción de forraje hidropónico.

Identificar las prácticas culturales necesarias para optimizar el rendimiento y la calidad del forraje en sistemas hidropónicos.

Aplicar principios de control del sistema de fertirrigación y de las soluciones nutritivas para incrementar la eficiencia y sostenibilidad de la producción.

Significado etimológico de hidroponía e inicios

La palabra hidroponía está compuesta por dos palabras griegas, *hidro*, que se significa agua; y *ponos*, que significa labor, trabajo, esfuerzo. Por lo cual se puede entender la hidroponía como un trabajo o labor que se desempeña por medio del agua. Los primeros experimentos se realizaron en 1920 (Dr. Gericke) en ambientes cerrados (indoors). Es una técnica relativamente nueva que se emplea para la producción de bienes hortícolas (forrajes) pero también con fines de investigación.

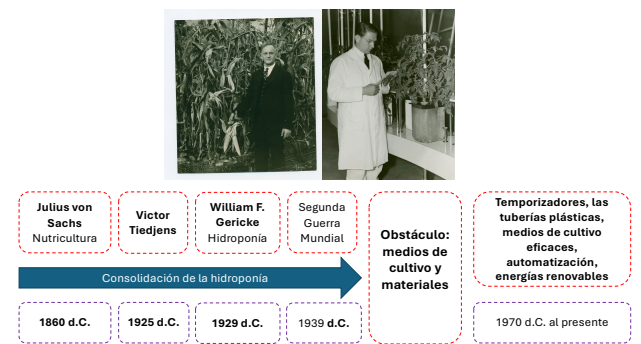
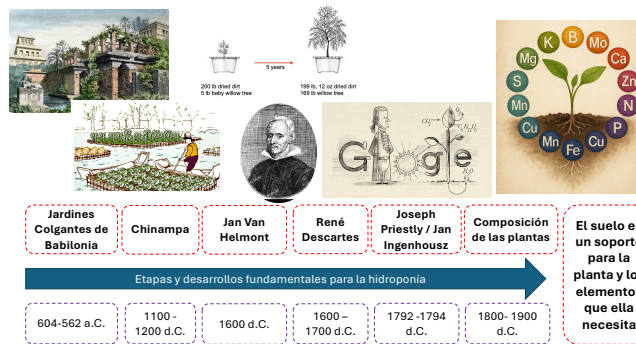
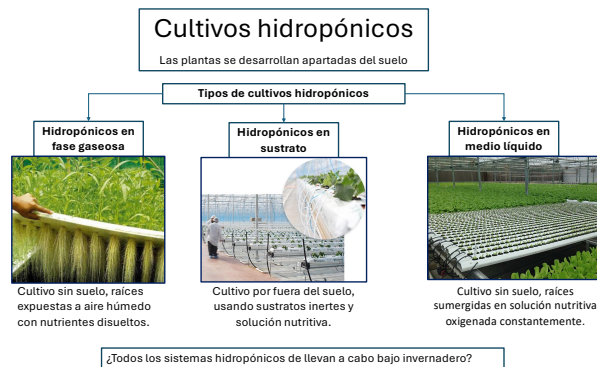
La ciencia que estudia el cultivo de plantas en soluciones nutritivas o en materiales inertes húmedos, en lugar de en el suelo.

El cultivo de plantas mediante la inmersión de las raíces en soluciones nutritivas, sustituyendo el suelo como medio de crecimiento.

La práctica de producir plantas en medios líquidos enriquecidos con nutrientes, en lugar de en el suelo.

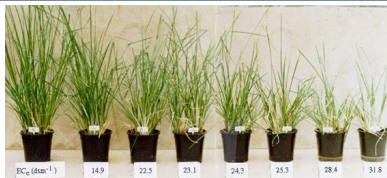
El cultivo de plantas en agua enriquecida con nutrientes, con o sin soporte de medios inertes como arena o grava.

La ciencia dedicada al cultivo de plantas sin suelo.



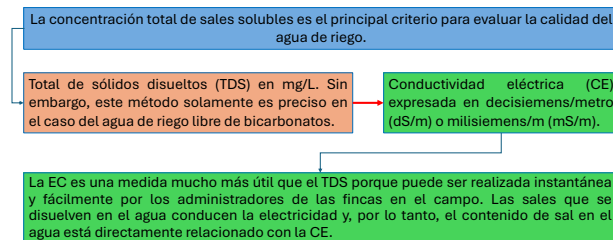
Conductividad eléctrica (CE)

La CE es la capacidad de un material para conducir una corriente eléctrica (conductancia eléctrica) y se expresa comúnmente en unidades de miliSiemens por metro (mS/m) o deciSiemens por metro (dS/m), que es 100 veces mayor que miliSiemens por metro.



En suelos, la CE es una medida de la cantidad de sales en la solución (salinidad del suelo). **La CE no proporciona una medición directa del tipo y cantidad de iones específicos**; sin embargo, se ha correlacionado con las concentraciones de nitratos, potasio, sodio, cloruro, sulfato y amoníaco.

Concentración total de sales solubles



CE

Se ha establecido que la conductividad eléctrica del agua de riego (ECw) es casi proporcional a la cantidad de sales presentes en ella. TDS en el agua puede estimarse por su relación con la conductividad eléctrica (ECw en dS/m) dada como:

Cuando ECw es menor que 5 dS/m:
 $TDS (mg/L) = 640 \times ECw (dS/m)$
 $TDS(%) = 0.64 \times ECw (dS/m)$
 $1dS/m = 640ppm = 640mg/L = 0.64g/L = 0.064\%$
Cuando ECw es mayor que 5 dS/m:
 $TDS (mg/L) = 800 \times ECw (dS/m)$

Los factores de conversión dependen del nivel de salinidad y de la composición del agua. Las sales de sulfato no conducen la electricidad de la misma manera que otros tipos de sales. Si el agua contiene altas concentraciones de sulfatos, los factores de conversión deben ajustarse.

Conductividad eléctrica

El terminos generales todas las aguas utilizadas en agricultura contienen sales. Según el Laboratorio de Salinidad de suelos del USDA "todos los suelos que se riegan se tienden a salinizar".... si evapotranspiración es mayor a las precipitación.

Fuente	CE a 25°C en dS/m
Agua de lluvia	0.15
Agua de río	0.30
Agua del Mar Mediterráneo	63 (mayor en el trópico)
Agua de riego	0.75 – 2.25

La "calidad" del agua debe ser una característica determinanda de manera relativa para cada zona, y se deben tener en cuenta factores como el sistema de se va a emplear, los tipo de suelos, de cultivos entre otros.

Aniones y Cationes

Determinar el tipo de **sales presentes en el agua es primordial**, ya que permite indagar acerca su origen, valorar el riesgo de causar perjuicios a los cultivos y/o al sustrato, y por lo tanto determinar su aptitud para riego.

Cationes: Calcio (Ca^{+2}), Magnesio (Mg^{+2}), Potasio (K^+) y Sodio (Na^+) en mmolc L^{-1} , meq L^{-1} ó mg L^{-1}

Aniones: Carbonatos (CO_3^{-2}), Bicarbonatos (HCO_3^-), Sulfatos (SO_4^{-2}) y Cloruros (Cl^-) en mmolc L^{-1} , meq L^{-1} ó mg L^{-1}

Sistemas hidropónicos en sustrato

En este sistema se utilizan sustratos inertes irrigados mediante sistemas de riego por goteo. Se pueden separar en dos grandes grupos: orgánicos e inorgánicos



¿Cuales no están en la lista que son comúnmente usados en nuestro medio?

Sistemas hidropónicos en fibra de coco



Se puede emplear para varios ciclos de cultivo debido que es un material muy estable. Es un material 100% orgánico que puede ser reciclado como enmienda orgánica en suelos.



Principales propiedades fisicoquímicas del agua para riego

Parámetros de calidad del agua

En suelo, las raíces exploran un mayor volumen en comparación con los sistemas hidropónicos, en los cuales el crecimiento de las raíces está restringido al volumen del contenedor.

pH

CE

¿Qué tipos de sales están presentes?

Normalmente el agua que se utiliza para la elaboración de las soluciones nutritivas contiene minerales y/o sales, podrá tener un pH ácido y altos contenidos de Na.

Se debe restar la cantidad de nutrientes ya presentes en el agua para garantizar que las concentraciones de nutrientes no excedan los niveles deseados.

Parámetros de calidad del agua

Nivel de calidad	CE (mS/cm)	Na o Cl (mmol/l)	Na (ppm)	Cl (ppm)	Idoneidad para hidroponía	Usos adecuados
1	<0.5	<1.5	<34	<53	++	Adecuada para todos los cultivos
2	0.5 – 1.0	1.5 – 2.5	34 - 57	53 - 87	+	No es adecuada cuando se requiere de recirculación
3	1.0 – 1.5	2.5 – 4.0	57 - 92	87 - 142	+/-	No se debe emplear para cultivos altamente sensibles a sales

Acumulación de Na en la solución nutritiva circulada es el contenido de sal del agua de riego. El contenido de Na en los fertilizantes usados para la solución es baja y contribuye poco a la acumulación de Na. Tomate (max. Na en la solución nutritiva 8 mmol/l o 184 ppm)

Parámetros de calidad del agua

El nivel de pH óptimo para la solución nutritiva en hidroponía es 5.5.

Las sales (fertilizantes) que contengan H acidificarán la solución.

Cuando se trata de aguas subterráneas es común que los contenidos de carbonatos y bicarbonatos sean altos y en consecuencia el pH alcalino, en estos casos se aplican ácidos (nitríco o fosfórico) para disminuir el pH. En el caso contrario se usa la potasa cáustica.

Hierro (Fe): Dependiendo de la capa del suelo desde donde se extraiga el agua, ésta puede contener altas concentraciones de Fe.

El pH se corrige en un solo sentido; si surge la necesidad de modificar el pH en ambos sentidos es un indicativo de que algo se está haciendo mal.

Parámetros de calidad del agua



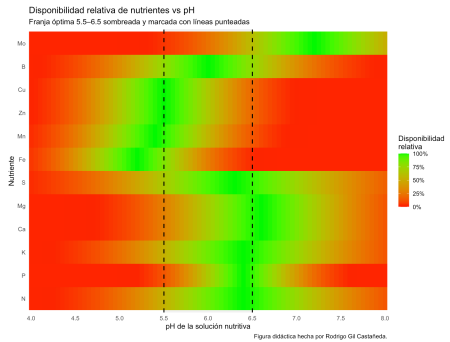
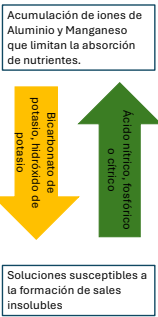
Ventajas	Desventajas
Se puede cultivar en suelos con baja fertilidad o que están inhabilitados por razones sanitarias.	Se requiere realizar una inversión inicial alta
No es necesario realizar preparaciones del suelo y se reduce el uso de pesticidas .	El personal a cargo debe tener un alto nivel de entrenamiento .
La hidroponía alcanza rendimientos hasta 10 veces superiores a lo tradicional.	Existe un riesgo de afectación por enfermedades de suelo si no se cuentan con sistemas apropiados.
Abre la posibilidad de usar de manera más eficiente recursos como el agua y los fertilizantes .	Las algas suelen crecer y taponar tuberías cuando las soluciones nutritivas entran en contacto con la luz .
Reduce considerablemente la afectación de plantas por patógenos del suelo .	Existen adaptaciones comerciales para un grupo reducido de especies . Hay una alta demanda de investigación y desarrollo para algunas especies.
Mayor control hídrico y nutricional de las plantas, incluso individualmente.	Es un sistema altamente sensible a fallas en el suministro de agua y nutrientes . Las plantas reaccionan de manera positiva o negativa en cuestión de horas.
Es un sistema adaptable a ambientes urbanos .	

El pH del agua en sistemas hidropónicos

El **pH** es un valor que indica el grado de acidez o alcalinidad de una solución acuosa. Se mide en una escala que va de 0 a 14, donde **7 es neutro**. Valores **menores a 7** corresponden a soluciones ácidas y valores **mayores a 7** a soluciones básicas o alcalinas. El pH refleja la concentración de iones de hidrógeno (H⁺) presentes en el agua y, en hidroponía, es un parámetro clave porque condiciona la solubilidad y la absorción de los nutrientes esenciales por las raíces.

Denominación	Rango del pH
Ultra ácido	<3.5
Extremadamente ácido	3.5 – 4.4
Acidez muy fuerte	4.5 – 5.0
Fuertemente ácido	5.1 – 5.5
Moderadamente ácido	5.6 – 6.0
Ligeramente ácido	6.1 – 6.5
Neutro	6.6 – 7.3
Ligeramente alcalino	7.4 – 7.8
Moderadamente alcalino	7.9 – 8.4
Fuertemente alcalino	8.5 – 9.0
Alcalinidad muy fuerte	> 9.0

Fuente: *USDA - NRCS*



En este contexto, la disponibilidad hace referencia a que los elementos nutritivos se encuentran en formas químicas solubles y accesibles, capaces de ser absorbidos y asimilados por la planta a través de sus raíces.

La franja de pH 5,5-6,5 representa una generalización, ya que existen especies que pueden prosperar fuera de este rango; por ejemplo, los arándanos son reconocidos como especies acidófilas que requieren condiciones más ácidas.

Panorama del mercado de sistemas hidropónicos

Tamaño del mercado: En 2020 se estimó en 9,500 millones de USD, con una proyección de crecimiento anual del 11,3%, alcanzando aproximadamente 17,900 millones de USD para 2026.

Motor de crecimiento: Mayor rendimiento frente a los métodos agrícolas convencionales, tendencia que se aceleró tras la pandemia de Covid-19.

Restricción: Alta inversión de capital requerida para proyectos a gran escala.

Oportunidad: Avances en tecnologías hidropónicas innovadoras que facilitan la expansión del sector.

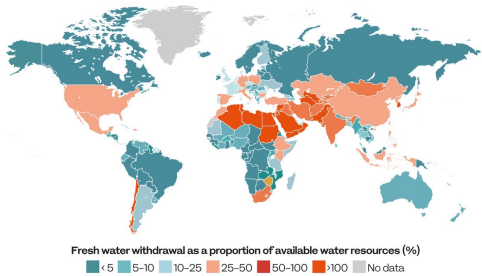
Reto: Riesgo de enfermedades transmitidas por el agua y proliferación de algas en sistemas cerrados.

Tendencia por tipo de cultivo: Se espera que el segmento de frutas registre la mayor tasa de crecimiento anual hasta 2025 dentro del mercado hidropónico.



WATER STRESS ON A GLOBAL LEVEL

Saudi Arabia is one of the most water-scarce countries in the world

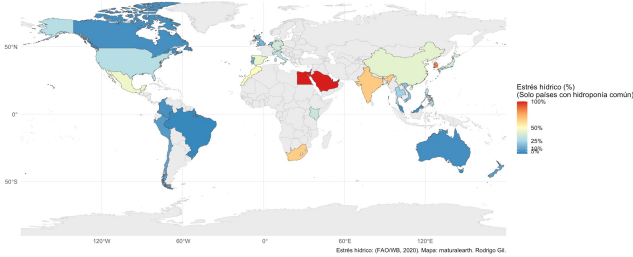


Source: FAO 2020

ARAB NEWS

Hidroponía bajo gradientes de estrés hídrico (FAO 2020)

Azul: hidroponía en contextos con mayor disponibilidad de agua • Rojo: hidroponía en alta escasez



Forraje Verde Hidropónico (FVH)

Contexto: crisis forrajera en sistemas pecuarios por sequías, inundaciones y altos costos de insumos.

Principio básico: producción de biomasa verde en 7-14 días mediante germinación de semillas sin suelo.

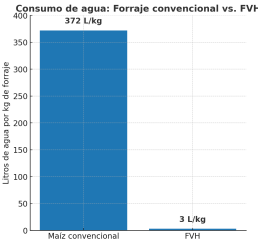
Relación con sostenibilidad: reducción de insumos externos, aprovechamiento de recursos locales, resiliencia frente a cambio climático.



La crisis forrajera y la sostenibilidad

¿Por qué forraje hidropónico?

- Problema actual:** sequías, inundaciones y altos costos reducen la disponibilidad de forraje.
- Alimentación animal = 50-80% del costo total de producción pecuaria.**
- Producción convencional:**
 - Maíz = **372 L agua/kg**
 - Sorgo = **271 L agua/kg**
- FVH: 2-3 L agua/kg → hasta 100 veces más eficiente.**
- Uso de recursos locales y estructuras rústicas = producción resiliente y sostenible.**



Ventajas del FVH



Nutritivas: aporte integral de raíces, tallos, hojas y semillas → carbohidratos, proteínas, vitaminas y minerales.



Ambientales: ahorro de agua (2–3 L/kg de forraje vs. >250 L en sistemas convencionales), eficiencia en espacio (170 m² equivalen a 5 ha de forraje en campo).

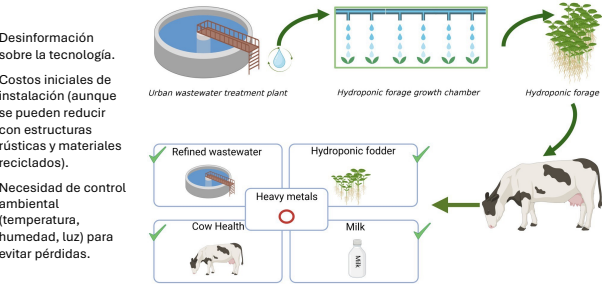


Productivas: ciclo corto (10–12 días), inocuidad, mejora en producción animal (más leche, mejor conversión alimenticia, menor incidencia de enfermedades).



Económicas: costos de producción 10 veces menores que sistemas a campo abierto.

Limitaciones y Desafíos



Componentes básicos del un sistema FVH

Forraje verde hidropónico

Estructura protegida

Tipos básicos de cubiertas

Dos aguas

Túnel

Media agua

Dimensiones y materiales

Módulos pequeños: ~15m2 (3x5)

Estructuras mayores: 150 m2 (5x30)

Materiales: mallas, plástico, madera

Bandejas, canaletas, soportes y racks

Aspectos de ubicación

Orientación norte-sur

Acceso cercano a agua de calidad

Proximidad al establo donde están los animales

Ambiente para el cultivo

Iluminación

Maximizar la luz difusa: evitar sombras

Plásticos/mallas en buen estado

Iluminación suplementaria solo en zonas con alta nubosidad

Ventilación

Intercambio con aire externo (puertas ventanas opuestas)

Evitar la condensación en bandejas y paredes

Evitar los encharcamientos

Temperatura

Rango recomendado: 18-26 °C

Evitar picos: >30 o <12 °C

Monitoreo con termómetro

Ejercicio de Aplicación en Clase

Discusión grupal: ¿Qué ventajas tendría implementar FVH en el contexto de cada productor?

Identificación de recursos locales que podrían usarse para un invernadero rústico.

Comparación del consumo de agua entre un kg de forraje tradicional vs. FVH.

Valor nutritivo y ventajas productivas del FVH

- Resaltar que el FVH es un alimento **completo**: incluye raíz, tallo, hoja y semilla → proteínas, carbohidratos, minerales y vitaminas.
- Relacionar directamente con los beneficios zootécnicos: mayor producción de leche, mejor conversión alimenticia, más rápida ganancia de peso, menor incidencia de enfermedades.
- Enfatizar que su **ciclo corto (10–12 días)** permite tener un suministro constante, independiente de la estación o el clima.

CÓMO OCURRE LA GERMINACIÓN

Imbibición y aumento de la respiración

Activación del metabolismo

Fase I Fase III Formación de la plántula

ESTRUCTURA DE LA SEMILLA

Dicotiledóneas

Meristemo apical de radícula

Hoja primitiva

Tegumento

Cotiledones

Monocotiledóneas

Meristemo apical del tallo

Cotiledón

Meristemo apical de raíz

Endospermo

Tegumento

P. Junqueira y Prof. H. Carvalho
CENA & ESAIQ USP

Fase I – Imbibición

Durante la primera etapa de la germinación, la semilla absorbe agua rápidamente en un proceso llamado *imbibición*.

Esta entrada de agua rehidrata los tejidos, reactiva las membranas celulares y estimula la actividad de las mitocondrias y de las proteínas que estaban inactivas.

Con ello, la respiración aeróbica se restablece y se activan enzimas que habían permanecido latentes.

En esta fase también comienza a regularse el equilibrio hormonal entre el ácido abscísico (ABA), que mantiene la dormancia, y las giberelinas, que promueven la germinación.

Este ajuste hormonal marca el inicio de los procesos metabólicos que preparan la semilla para el crecimiento de la plántula.

IMBIBICIÓN

Nutrientes involucrados: **Potasio, Calcio, Zinc, Cobre y Níquel**

Los nutrientes presentes en la semilla (Ca, Mg, Zn, Cu, B y Ni) actúan como cofactores metabólicos esenciales. Su deficiencia puede retrasar la reactivación de la actividad fisiológica durante la germinación.

Reserva inicial

Endospermo

Cotiledones

Monocotiledónea

Advertencia: El exceso de potasio (K) en la solución del suelo puede dificultar la absorción de agua por parte de la semilla, afectando el proceso de imbibición y el establecimiento inicial de plántula.

Fase II – Digestión de las reservas

En esta fase, el proceso de germinación avanza hacia la movilización de las reservas almacenadas en la semilla.

La absorción continua de agua facilita el transporte de giberelinas (GA) desde el embrión hacia las células de la capa de aleurona, donde actúan como señales que activan la síntesis de enzimas hidrolíticas como amilasas, lipasas y proteasas.

Estas enzimas degradan los compuestos de reserva, almidones, lípidos y proteínas, presentes en el endospermo o cotiledones, transformándolos en moléculas simples: azúcares, aminoácidos y ácidos grasos.

Dichos compuestos, ahora solubles y fácilmente difusibles, son transportados hacia el embrión para ser utilizados como fuente inmediata de energía y carbono.

Durante esta etapa, la actividad respiratoria de la semilla se incrementa considerablemente, reflejando una alta demanda energética necesaria para la división celular y la expansión de los tejidos embrionarios.

La eficiencia de esta fase depende tanto de la integridad fisiológica de la semilla como de la disponibilidad de oxígeno y temperatura adecuada, factores que condicionan la velocidad de las reacciones enzimáticas.

Fase II

Digestión de las reservas

Nutrientes involucrados: **Níquel, Zinc, Hierro, Cobre, Manganeso, Calcio y Magnesio**

Estos nutrientes actúan como cofactores enzimáticos, es decir, se unen a las enzimas para que puedan funcionar correctamente.

Ejemplo: **Ni**

El níquel (Ni) actúa como cofactor de la enzima ureasa, responsable de movilizar el nitrógeno durante la germinación. La ureasa hidroliza la urea, un producto de la degradación de proteínas y aminoácidos de reserva, transformándola en amoníaco (NH₃) y dióxido de carbono (CO₂).

CH₄N₂O + H₂O → **UREASA** → NH₃ + CO₂

El níquel (Ni) como cofactor enzimático

•Función principal:

El níquel (Ni) actúa como cofactor de la enzima ureasa, indispensable en el metabolismo del nitrógeno durante la germinación.

•Rol de la ureasa:

La ureasa cataliza la hidrólisis de la urea, un compuesto derivado de la degradación de proteínas y aminoácidos de reserva.

•Productos de la reacción:

La urea se transforma en amoníaco (NH₃) y dióxido de carbono (CO₂), evitando la acumulación de compuestos tóxicos en el embrión.

•Importancia fisiológica:

El amoníaco liberado se reutiliza para la síntesis de aminoácidos y otras moléculas nitrogenadas esenciales para el crecimiento inicial de la plántula.



•**Reactivación fisiológica:**
La semilla incrementa gradualmente la absorción de agua y la respiración, reflejando una mayor actividad metabólica del embrión.

•**Transición entre fases:**
Los procesos iniciados en la fase I (imbibición) y estabilizados en la fase II (digestión de reservas) se intensifican nuevamente en esta etapa.

•**Crecimiento celular:**
Se reanuda la división y expansión de las células embrionarias, dando lugar a la formación de nuevos tejidos.

•**Organogénesis inicial:**
Emerge la raíz primaria, seguida del hipocótilo y los cotiledones, que permitirán el inicio de la fotosíntesis.

•**Condiciones ambientales:**
El éxito de la germinación depende de una adecuada disponibilidad de oxígeno, humedad y temperatura, que garantizan la respiración y el desarrollo continuo.



•**Calcio (Ca):**
Favorece la formación y estabilidad de la pared celular, asegurando la integridad de los tejidos en crecimiento. Es esencial para la elongación de la radícula y la comunicación entre células durante el desarrollo inicial.

•**Boro (B):**
Participa en la síntesis de la pared celular y en la movilización de azúcares hacia los tejidos meristemáticos. Su presencia garantiza una radícula firme y funcional, con buena capacidad de absorción de agua.

•**Potasio (K):**
Regula el equilibrio osmótico celular y la presión de turgencia, facilitando la entrada de agua a las células. Contribuye al alargamiento de la plántula y al mantenimiento del potencial hídrico interno.

Actividad: Observación de la germinación del maíz

1. Diríjanse al sitio donde se encuentran los germinados de maíz
2. Seleccione plantas que se encuentren en diferentes estados de desarrollo
3. Extraigan cuidadosamente las plántulas del sustrato, procurando no dañar las raíces
4. Tomen fotografías claras de cada estado de germinación observado
5. Describan las estructuras visibles (radícula, coleóptilo, plúmula, cotiledón, etc.) y registren las diferencias entre etapas
6. Organicen las observaciones en una secuencia cronológica que muestre el progreso del proceso de germinación.