

# SUMAR FÓSFORO, HACE LA DIFERENCIA

## FÓSFORO EN LAS PLANTAS Y ORGANISMOS



### MANUAL TÉCNICO FICHAS 1 A 12



# FÓSFORO EN LAS PLANTAS Y ORGANISMOS

## ÍNDICE

#1 - <u>EL FÓSFORO “P” ES FUNDAMENTAL PARA LA VIDA EN TODOS LOS SERES VIVOS</u>	1
#2 - <u>COMPARACIONES ENTRE PLANTAS Y ANIMALES</u>	2
#3 - <u>LAS ESTRUCTURAS DE LOS SERES VIVOS TIENEN FÓSFORO</u>	3
#4 - <u>EL FÓSFORO REGULA LA HERENCIA Y SU FUNCIONAMIENTO</u>	4
#5 - <u>EN LOS SERES VIVOS EL FÓSFORO ES ENERGÍA</u>	5
#6 - <u>¿QUÉ HACEN LAS PLANTAS CON LA ENERGÍA?</u>	6
#7 - <u>EL FÓSFORO EN EL SECUESTRO DEL CARBONO</u>	7
#8 - <u>EL TRANSPORTE DE NUTRIENTES Y OTROS COMPUESTOS REQUIERE FÓSFORO</u>	8
#9 - <u>LA FIJACIÓN BIOLÓGICA DE NITRÓGENO REQUIERE FÓSFORO</u>	9
#10 - <u>¿CÓMO RECONOCEMOS QUE LAS PLANTAS ESTÁN DEFICIENTES EN FÓSFORO?</u>	10
#11 - <u>¿CÓMO RESPONDEN LAS PLANTAS A LA CANTIDAD DE FÓSFORO DEL SUELO?</u>	11
#12 - <u>CADA CULTIVO TIENE DIFERENTES REQUERIMIENTOS DE FÓSFORO</u>	12

El fósforo con su símbolo "P", es un elemento abundante en la corteza terrestre. Su alta reactividad lo lleva a formar minerales de baja solubilidad, desafiando su manejo.

Es uno de los 17 nutrientes esenciales para la vida vegetal y animal, desde tejidos vegetales hasta dientes y huesos. Junto con el nitrógeno y el potasio, forma los macronutrientes fundamentales para el crecimiento de cultivos. Limitado en ecosistemas naturales y cultivados, el fósforo desempeña roles clave en la regulación génica, la estructura celular y la transferencia de energía, su importancia trasciende la agricultura, siendo vital para la vida en general.



El fósforo es un elemento químico, de símbolo "P" debido a su nombre en griego *phōsphōros*. Es un elemento abundante en la corteza terrestre, aunque por su alta reactividad suele estar formando minerales de relativamente baja solubilidad.

El fósforo es uno de los elementos más relevantes para la vida en el planeta, formando parte de tejidos vegetales y animales tan importantes como los dientes y los huesos. Su nombre significa "el que trae la luz" (de allí deriva la palabra fosforescente), este significado se alinea con sus funciones vitales en los seres vivos.

El fósforo es uno de los 17 nutrientes considerados esenciales para el crecimiento y desarrollo de las plantas, y junto con el nitrógeno (N) y el potasio (K) forman el grupo de macronutrientes, debido a que los vegetales requieren grandes cantidades de los mismos para un crecimiento adecuado.

El fósforo suele ser el segundo nutriente que más limita el crecimiento de plantas en los ecosistemas terrestres, naturales y cultivados, luego del nitrógeno, lo cual se relaciona a las funciones destacadas en las que el fósforo participa activamente:

- Compone estructuras funcionales en las membranas celulares.
- Es parte de la regulación génica formando parte de los ácidos nucleicos (ADN y ARN).
- Participa en la transferencia de energía en todos los procesos metabólicos en forma de ATP (adenosín trifosfato) y otros compuestos derivados.

García F., Picone L & Ciampitti I. 2014. Fósforo. En Echeverría y García (Eds.). *Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos*. 2da Ed. Ediciones INTA, Buenos Aires, 2014. 904 Pp. ISBN: 978-987-521-565-8

Entender cómo las plantas y los animales obtienen el fósforo es fundamental. Las plantas absorben fosfatos del suelo y los incorporan en sus tejidos mediante la fotosíntesis, convirtiendo la energía lumínica en ATP. Los animales obtienen fósforo a través de la ingesta de alimentos, ya sea plantas o animales, aprovechando la energía acumulada en ellos. En la producción ganadera, es crucial que los forrajes tengan una concentración adecuada de fósforo para el desarrollo de tejidos animales y la digestibilidad del material forrajero. Comprender estos procesos es esencial para maximizar la productividad agrícola y ganadera, asegurando un suministro adecuado de fósforo para el crecimiento y desarrollo de cultivos y animales.



Las plantas y los animales tienen mecanismos muy diferentes para obtener el fósforo que necesitan para formar sus tejidos y llevar a cabo sus funciones vitales.

Las plantas como productores primarios (organismos que pueden obtener energía del sol y carbono de la atmósfera, y a partir de ambos construir sus propios tejidos) incorporan el fósforo absorbiendo formas minerales sencillas (fosfatos) desde el suelo, e incorporándolo luego a sus tejidos a través de diversas rutas metabólicas.

Las plantas son capaces de captar la energía lumínica del sol y transformarla en energía química. Este proceso se denomina fotosíntesis, y la energía lumínica se transforma en energía química en una molécula rica en fósforo (Adenosín Trifosfato, o más comúnmente conocida como ATP): esta transformación de energía que realizan las plantas (y algunos otros organismos inferiores) y su acumulación como si fuesen pequeñas baterías en moléculas con fósforo permitió la evolución de la vida en el planeta.

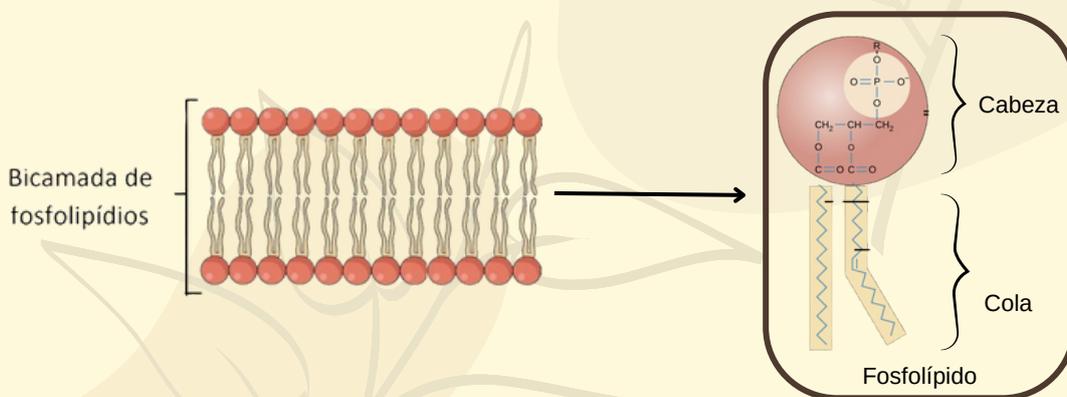
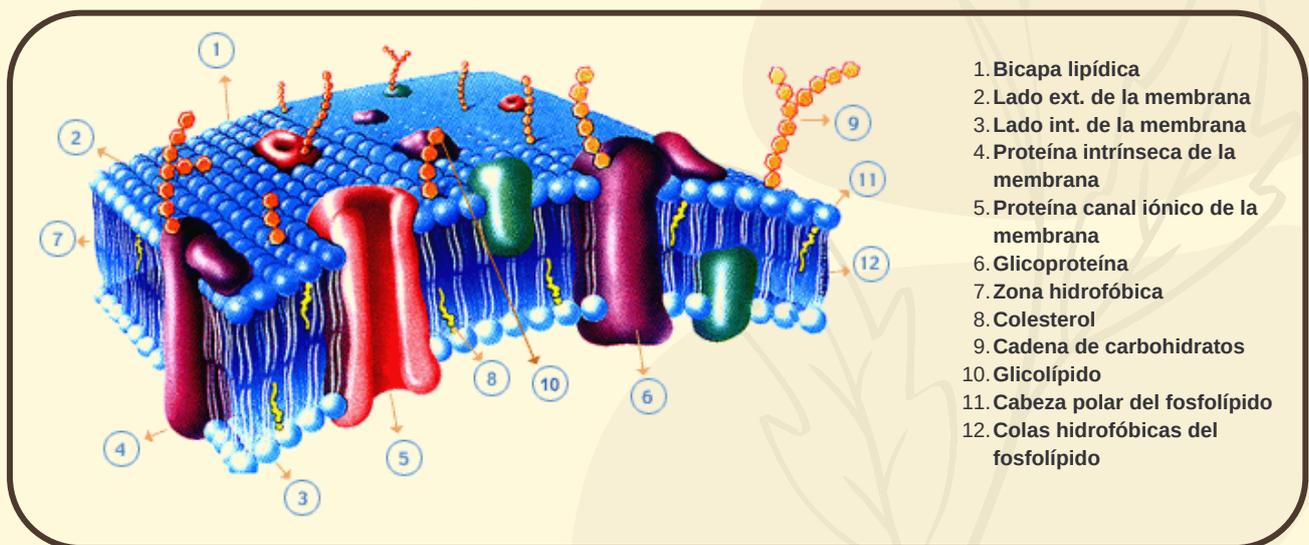
Por su parte, los animales obtienen el fósforo que precisan para vivir a través de la incorporación del mismo contenido en los alimentos, que pueden ser plantas u otros animales, aprovechando también la energía acumulada en estos alimentos. Es por ello que es clave para una producción ganadera de alta productividad que los forrajes consumidos por los animales tengan, además de cantidades importantes de energía, una adecuada concentración de fósforo para el desarrollo correcto de tejidos animales. Asimismo, un elevado contenido de nutrientes como el fósforo aumentan la digestibilidad del material forrajero, optimizando la obtención de energía a partir de este material.

Marschner H. 1995. *Mineral Nutrition of Higher Plants*. Academic Press Inc. London 2da ed. 889 pp.  
 Vistoso G., Erika; Sandaña P.; Iraira, S. 2017. *Fertilización fosfatada de praderas en suelos Trumaos de la Región de Los Lagos*. 124 p. Colección de Libros INIA N° 37. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Centro Regional de Investigación Remehue, Osorno, Chile.

Las células son las unidades funcionales y estructurales de los seres vivos, rodeadas por membranas, formadas por fosfolípidos de la membrana celular por el fósforo es un nutriente fundamental en esa estructura de los seres vivos.

Este elemento estructural no solo está presente en las membranas externas, sino también en órganos internos como las mitocondrias. Gestionar eficientemente el suministro de fósforo es crucial porque sin P se limita el funcionamiento de los seres vivos.

### Membrana plasmática



Las células de los seres vivos son las unidades estructurales y funcionales que están rodeadas por membranas formadas, entre otras cosas, de una doble capa de fosfolípidos (fosfatos + ácidos grasos). El fósforo forma parte de la cabeza polar de estos lípidos, permitiendo la formación de bicapas lipídicas que actúan como barreras selectivas para el paso de sustancias hacia y desde la célula.

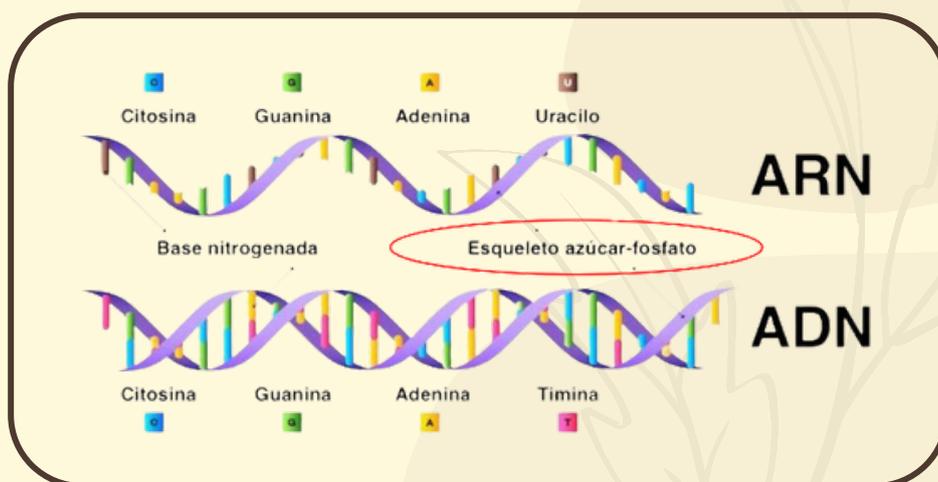
No solo las membranas externas de la célula tienen esta composición: los órganos internos de las células (organelas como por ejemplo las mitocondrias) también tienen estas membranas.

Es por ello que se destaca el rol estructural del fósforo en todos los seres vivos: sin P no podrían existir las estructuras celulares y el funcionamiento de los seres vivos.

Megías M, Molist P, Pombal MA. (2020). Atlas de histología vegetal y animal. La célula. Acceso 3 Mar 2020 de: <http://mmegias.webs.uvigo.es/5-celulas/1-introduccion.php>

Portal Educativo. 2015. Acceso 3 Mar 2020 de [www.portaleducativo.net](http://www.portaleducativo.net)

La presencia vital del fósforo en la genética y síntesis proteica destaca su relevancia en todos los seres vivos. Tanto el ADN como el ARN, estructurados con bases nitrogenadas unidas a fosfatos, definen las características genéticas de cada especie. En plantas, el ADN se encuentra en el núcleo, mitocondrias y cloroplastos, resaltando el rol estructural del fósforo en la replicación celular. Gestionar eficientemente el fósforo es clave para mantener la integridad genética y optimizar la productividad agrícola.



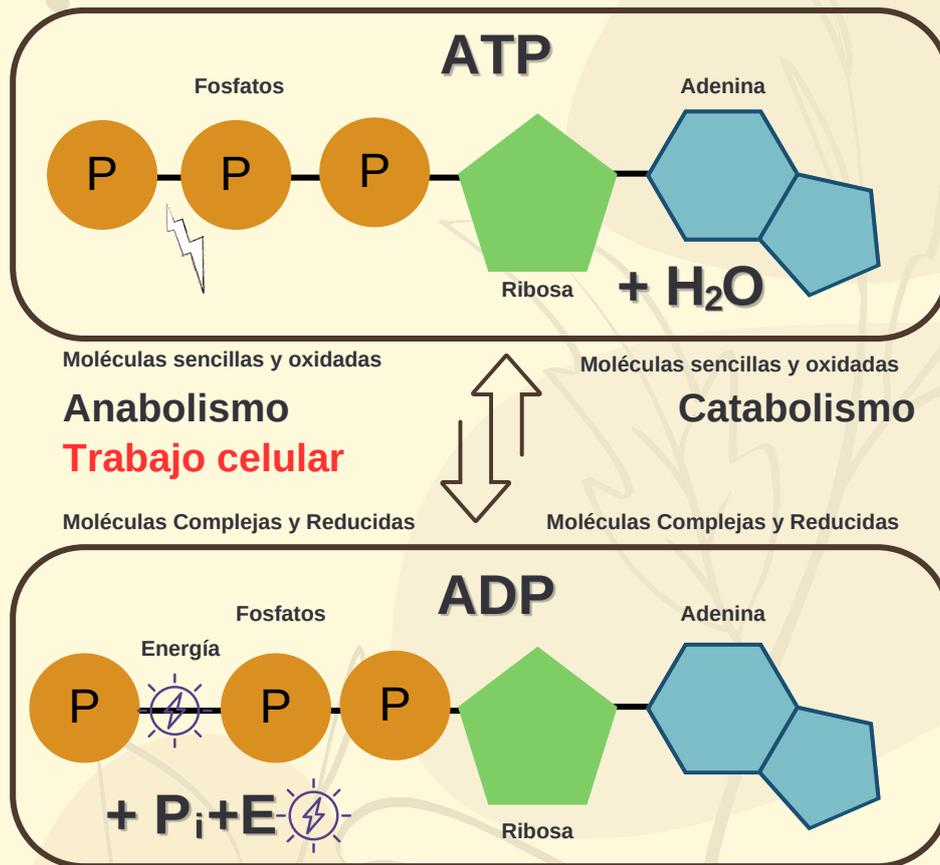
La transmisión genética (herencia) en todos los seres vivos está regulada por dos biomoléculas o ácidos nucleicos: la más famosa es el ADN (Ácido Desoxirribonucleico), y la segunda, menos conocida y no por ello menos importante, el ARN (Ácido Ribonucleico), que regula la síntesis de proteínas.

Tanto el ADN como el ARN están formados por bases nitrogenadas en una estructura ("esqueleto") de una pentosa (azúcar) combinada con fosfatos; la secuencia de bases (adenina, citosina, guanina y timina o uracilo) determina las características propias de cada especie.

En las plantas el ADN no está solamente ubicado en el núcleo celular: las mitocondrias tienen su propio genoma, y los cloroplastos (orgánulos donde se produce la fotosíntesis) también tienen su propio genoma ya que tanto las mitocondrias como los cloroplastos se reproducen dentro de la célula. La diferencia entre el ADN del núcleo y los otros es que en el primero, el ADN está empaquetado en cromosomas, mientras que el ADN de las mitocondrias y cloroplastos son circulares, como los de las bacterias,

Raffino, María Estela 2019. "Ácidos Nucleicos" En: Concepto de. Disponible en: <https://concepto.de/acidos-nucleicos/>. Consultado: 03 de marzo de 2020. Fuente: <https://concepto.de/acidos-nucleicos/#ixzz6FetB9XzY>

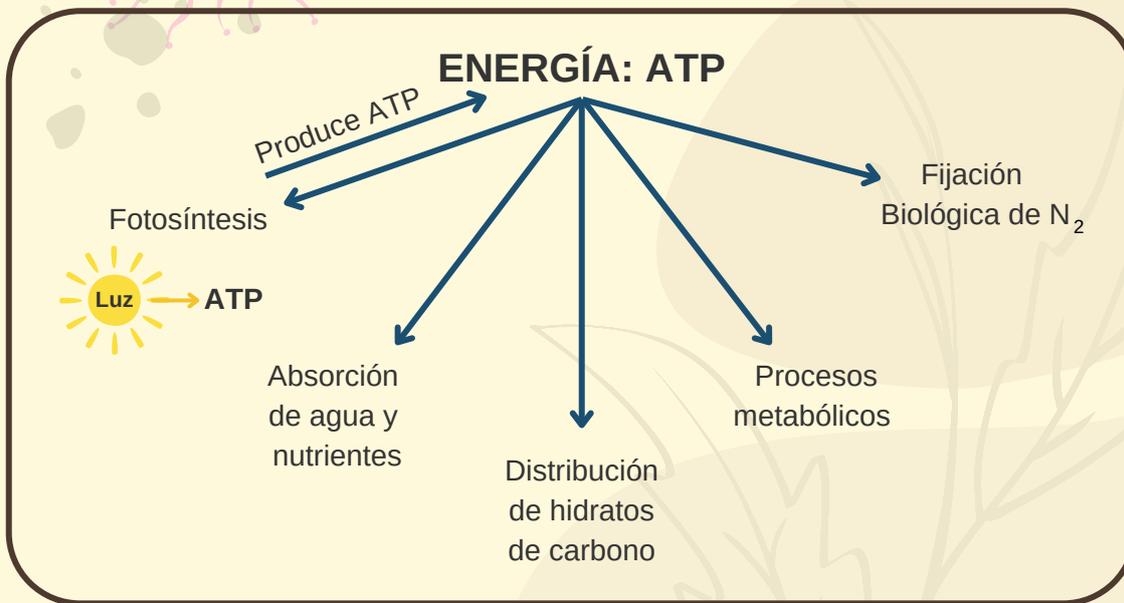
El ATP, adenosín trifosfato, es el intermediario energético en el mundo biológico. Actúa como pequeñas baterías, almacenando y transportando energía química vital. La hidrólisis del ATP a ADP libera energía necesaria para funciones celulares. En las plantas, la fotosíntesis es clave en la generación de ATP, resaltando la importancia del fósforo en la energía celular.



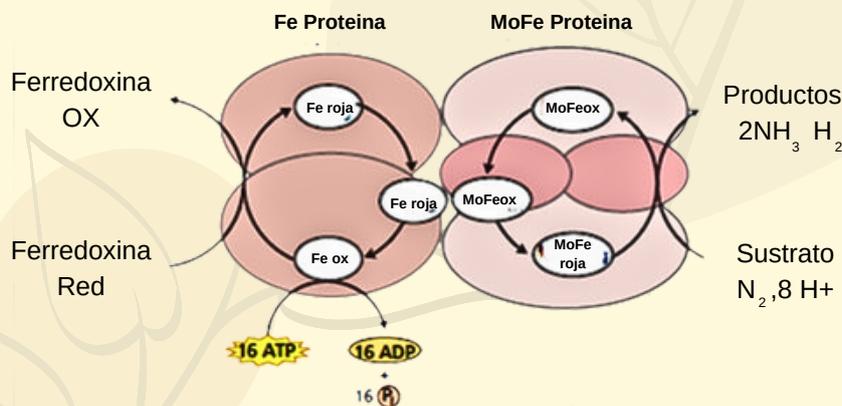
Sabemos que el ATP es el intermediario rico en energía más común y universal, y que la energía química para el funcionamiento de los seres vivos es almacenada y transportada en el ATP (adenosín trifosfato), como si fuesen pequeñas baterías, pero ¿cómo se usa luego esa energía acumulada? La base del mecanismo de transporte de energía, es que los grupos fosfatos se repelen entre ellos, y que para mantener unidos los fosfatos en un grupo trifosfato hace falta mucha energía, concretamente 7,7 kcal de energía libre por mol de ATP, que es la misma cantidad de energía que se libera cuando el ATP se hidroliza a ADP (adenosin difosfato). Es decir, cuando pierde un grupo fosfato por acción del agua. El ATP es entonces una molécula orgánica que al “romperse” libera la energía que se usa para el funcionamiento de los seres vivos. En las plantas, el principal productor de ATP es la fotosíntesis, que utiliza la energía lumínica para mantener los enlaces entre los grupos fosfatos.

Curtis, H., N. Sue Barnes, Adriana Schnek, Graciela Flores. 2008. *Biología*. Editorial Panamericana Costas G. 2018. ¿Qué es el ATP? *Cienciaybiología.com*. Accedido el día 1/2/2024.

Las plantas con la energía acumulada realizan la fotosíntesis, incorporan nutrientes, distribuyen el carbono capturado, activan su metabolismo y pueden estimular la fijación biológica del nitrógeno. Si una planta tiene deficiencia de fósforo se verá afectada para capturar y usar la energía, lo que limitará su desarrollo y crecimiento.



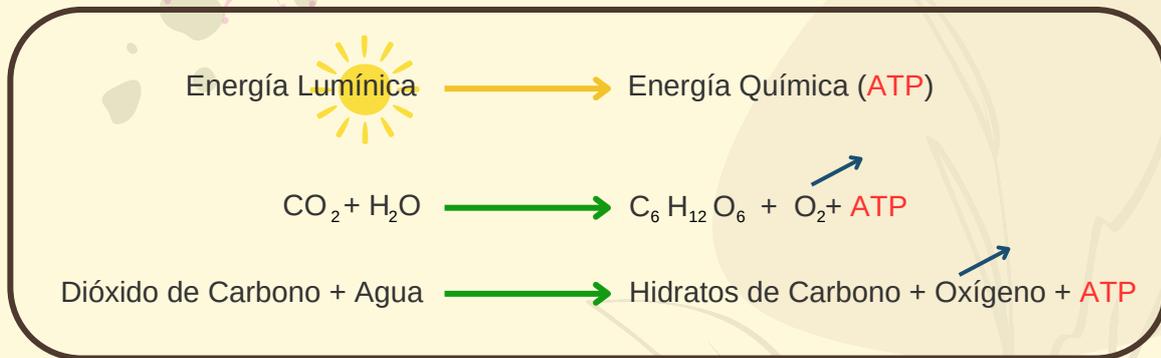
**Complejo enzimático nitrogenasa**



Las plantas utilizan la energía acumulada en los grupos fosfatos del ATP en numerosas funciones vitales: Fotosíntesis para la formación de hidratos de carbono y crecer. Incorporación de nutrientes transportando algunos elementos que están en el suelo (por ejemplo, el fósforo) hasta las células donde participan del funcionamiento de las plantas. Distribución del carbono fijado en la fotosíntesis a todos los tejidos en un proceso activo con consumo de energía (ATP). Activación del funcionamiento de las plantas (metabolismo); contribución a la fijación biológica del nitrógeno desde el aire incorporándolo en las plantas (leguminosas). Las deficiencias de fósforo en las plantas se relacionan inmediatamente con su rol en la transferencia y almacenaje de energía: las plantas con deficiencias tienen un período inicial de crecimiento lento y disminuido.

Marschner H. 1995. *Mineral Nutrition of Higher Plants*. Academic Press Inc. London 2da ed. 889 pp. García F., Picone L & Ciampitti I. 2014. Fósforo. En Echeverría y García (Eds.). *Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos*. 2da Ed. Ediciones INTA, Buenos Aires, 2014. 904 Pp. ISBN: 978-987-521- 565-8

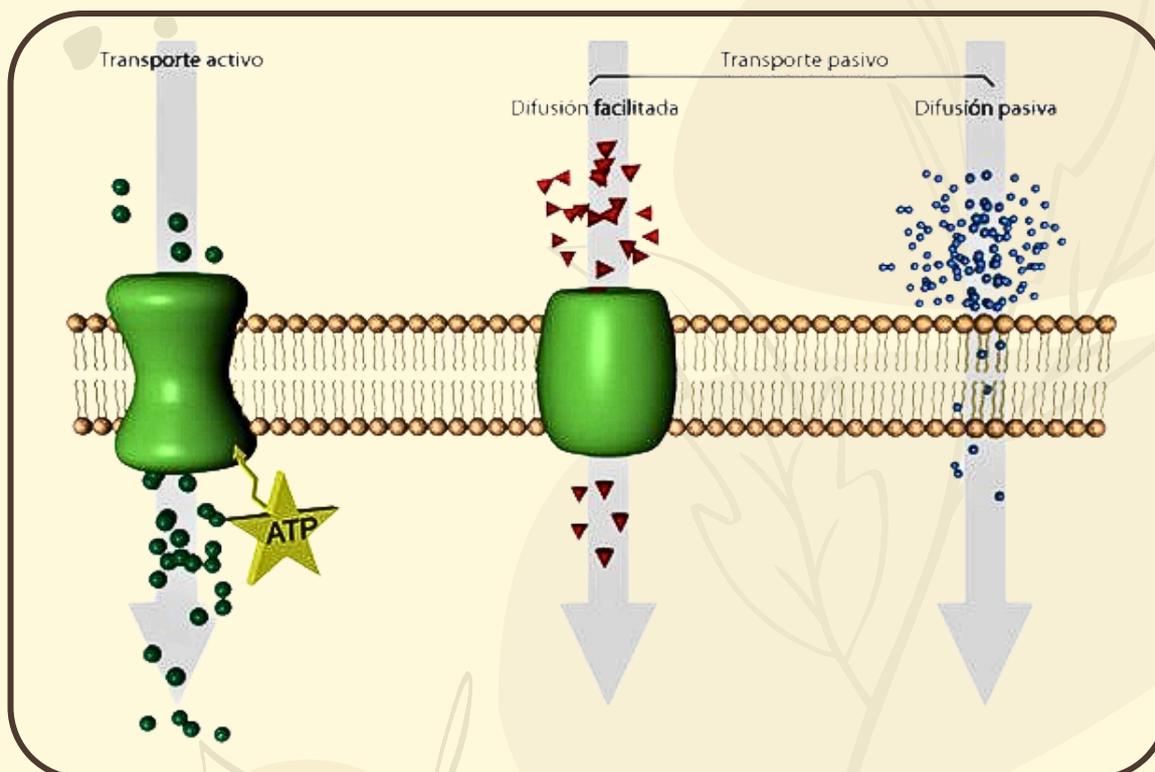
La disponibilidad de fósforo es vital para que las plantas realicen la fotosíntesis. Al tener deficiencia de este nutriente la planta queda limitada para la fotosíntesis y por lo tanto para el crecimiento.



Las plantas obtienen el carbono que precisan para construir sus estructuras del dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) atmosférico (es decir son autótrofas) incorporando por las raíces agua y nutrientes como el Fósforo que están en el suelo para formar azúcares y oxígeno. La fotosíntesis ocurre en pequeños orgánulos de células que están en las hojas (cloroplastos) transformando la energía del sol en energía química, que se almacena en forma de ATP. La clorofila es el pigmento que capta la radiación solar reflejando el color verde de las hojas. La disponibilidad de fósforo es vital para el proceso de fotosíntesis, función que secuestra el C atmosférico y lo convierte en formas de C orgánicas estables, ya que en el proceso la molécula de Adenosin difosfato (ADP) se fosforila con un fosfato más, finalizando la reacción como Adenosin trifosfato (ATP). Si bien la falta de fósforo puede afectar la tasa de fotosíntesis, esta deficiencia tiene mayor impacto sobre el crecimiento, el número y tamaño final de las hojas, que es el órgano donde esta reacción de fijación de C atmosférico tiene lugar.

Clark, M.A., J. Choi y Douglas Matthew. 2018. *Biology 2e*. Rice University, Houston, TX. USA. 1578 pp. <https://openstax.org/details/books/biology-2e>. 14 Raisman, J. y González, A.M. 2015. *Hipertextos del área biología*. Univ. Nacional del Nordeste. Fac. Ccias Agrarias. Accedido: 7 Mar. 2020. <http://www.biologia.edu.ar/plantas/fotosint.htm> García F., Picone L & Ciampitti I. 2014. *Fósforo*. En Echeverría y García (Eds.). *Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos*. 2da Ed. Ediciones INTA, Buenos Aires, 2014. 904 Pp. ISBN: 978-987-521-565-8

Aunque no se comprende completamente, se sabe que las células vegetales poseen moléculas transportadoras específicas que reconocen cada nutriente. La presencia de oxígeno es crucial para el gasto energético en forma de ATP. La entrada de elementos como el agua en las plantas se realiza por transporte pasivo, aprovechando gradientes de concentración. Sin embargo, nutrientes como el fósforo y el zinc, así como los azúcares producidos en la fotosíntesis, requieren para su movilización procesos activos (ATPasas) que consumen energía, en forma de ATP.



Algunos elementos, por ejemplo, el agua, ingresan y se mueven en las plantas sin requerimientos específicos de energía por transporte pasivo por gradientes o diferencias de concentración. Muchos compuestos inorgánicos (nutrientes tales como el P y el Zn) y los azúcares formados en la fotosíntesis ingresan a las células en contra del gradiente de concentración (es decir hay más de estos nutrientes en el destino que en el origen); por ello, este ingreso requiere la participación de procesos activos con la participación de enzimas transportadoras específicas (ATPasas) y consumiendo energía (en forma de ATP). La absorción de nutrientes con gasto de energía en forma de ATP no es enteramente comprendido por el mundo científico. Aunque parece que las células vegetales, contienen en sus paredes celulares una molécula especial (llamada transportadora o carrier) con la capacidad de reconocer cada ion o nutriente específico, se sabe que es importante que haya oxígeno disponible para que ocurra el gasto de ATP.

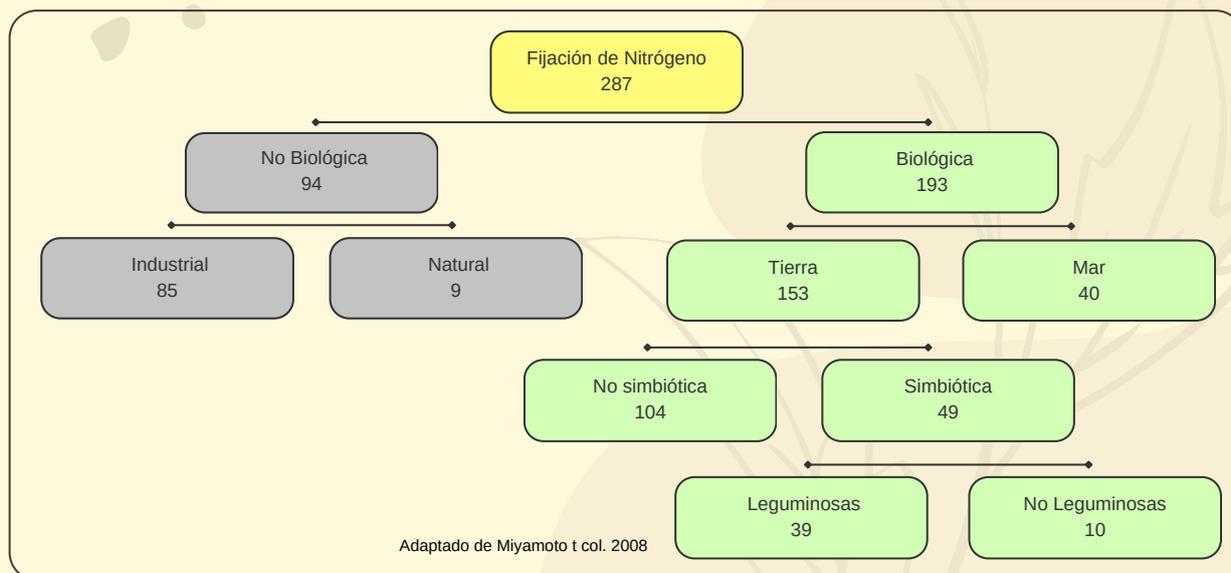
Wikillerato. 2013. *La Membrana Plasmática*. 2013. Licencia de Creative Commons.

[http://www.wikillerato.org/La\\_membrana\\_plasm%C3%A1tica.html](http://www.wikillerato.org/La_membrana_plasm%C3%A1tica.html). Accedido Abr 9 2020. Sondergaard, T.E., A.

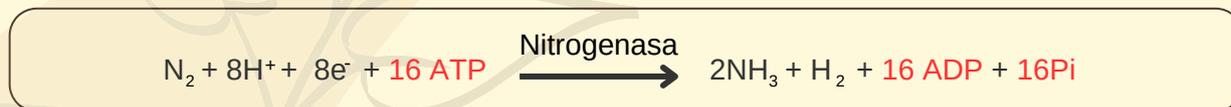
Schulz y M.G. Palmgren. 2004. *Energization of Transport Processes in Plants. Roles of the Plasma Membrane H<sup>+</sup>-ATPase*. *Plant Physiol.* 136: 2475. <https://www.cropnutrition.com/resource-library/how-vegetable-plant-roots-absorb-nutrients/>. Accedido el 1/2/2024

El nitrógeno integra la base estructural de proteínas, enzimas y moléculas como el ADN y ARN. En el aire que respiramos existe nitrógeno, pero su composición hace que no pueda ser absorbido por las plantas, salvo que sea reducido (fijado) por algunas bacterias a formas amoniacales. El fósforo en su versión molecular, es un transportador de energía que es fundamental para la fijación biológica de nitrógeno.

## Millones de toneladas de Nitrógeno fijados anualmente en el planeta



El nitrógeno es un macronutriente principal que participa centralmente en la funcionalidad de los seres vivos, porque integra la base estructural de las proteínas (aminoácidos), entre ellas las enzimas, que son un tipo especial de proteínas, y de moléculas ligadas a la transmisión genética como el ADN y ARN. En el aire encontramos nitrógeno en una molécula “estable” (N<sub>2</sub>) donde 2 átomos de N están unidos por un enlace triple (N ≡ N) que es muy fuerte, lo cual impide que el nitrógeno del aire pueda ser utilizado directamente por los organismos vivos. Para que ello sea posible, es necesario que el nitrógeno atmosférico sea reducido a formas amoniacales, que es la forma en que el nitrógeno pueda entrar a formar parte de los organismos. En la naturaleza, solo los organismos más antiguos del planeta, algunas bacterias, son metabólicamente capaces de realizar esta transformación, que es uno de los pilares de la vida en el planeta tal cual la conocemos. No obstante, esta reacción bioquímica de reducción del N<sub>2</sub> requiere grandes cantidades de energía para poder ser llevada a cabo, y en el mundo viviente, la transmisión de energía se identifica con una molécula rica en fósforo, el ATP: se necesitan 16 moléculas de ATP por cada molécula de N<sub>2</sub> para romper el triple enlace molecular.



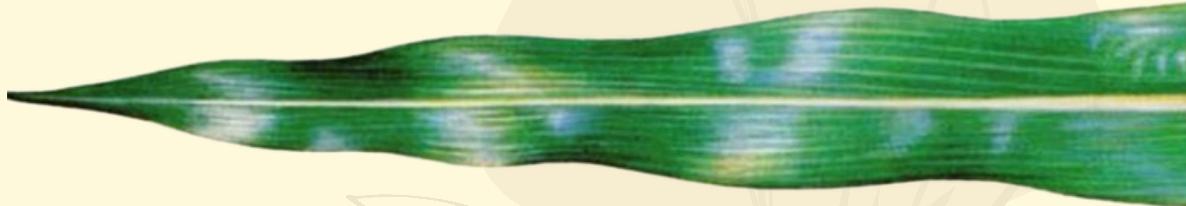
Esta reacción, denominada Fijación Biológica de Nitrógeno (FBN) es llevada a cabo por la enzima nitrogenasa, enzima de bacterias que pueden vivir libres en el suelo o asociadas a las raíces de las plantas, especialmente en la familia de leguminosas o fabáceas. Las plantas del planeta se nutren con nitrógeno del aire, con más del 70% proveniente de procesos regulados biológicamente (FBN), y el fósforo es crítico en lograr su funcionamiento. La FBN es un proceso metabólico esencial para la vida y de relevancia para la salud ambiental del planeta, ya que el carbono que puede ser fijado en la fotosíntesis está muchas veces limitado por la disponibilidad de nitrógeno para las plantas.

Miyamoto, C., Q. Ketterings, J. Cherney, y T. Kilcer. 2008 Nitrogen Fixation. Agronomy Cornell University. Agronomy Fact Sheet Series. Fact Sheet 39. 1-2. <http://nmsp.cals.cornell.edu/publications/factsheets/factsheet39.pdf> Taiz L y E. Zeiger. 2006. Plant Physiology. 4th Ed. Sinauer Associates Inc., USA.

Todos los órganos y procesos de funcionamiento de las plantas se alteran cuando el suelo no puede proveer en tiempo y forma el fósforo que las plantas requieren.

Existen diferentes maneras de distinguir las deficiencias de fósforo, estas pueden ser por un crecimiento reducido de la planta de cultivo, menor expansión de las hojas y menor número macollos (visible en hojas viejas), aumento la formación de raíces laterales y por último disminución en la floración y la producción de frutos y semillas.

**Planta sana**



**Planta con deficiencia de fósforo**



**Planta con deficiencia de Potasio**



**Planta con deficiencia de Nitrógeno**



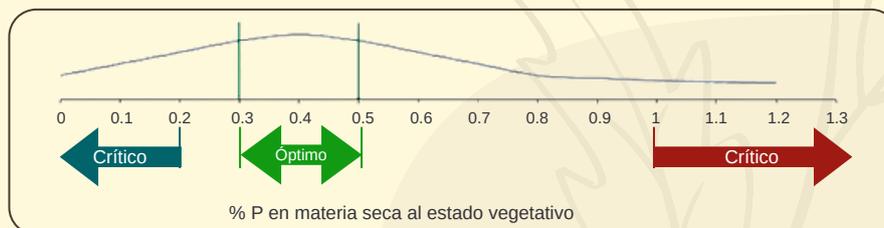
Todos los órganos y procesos de funcionamiento de las plantas se alteran cuando el suelo no puede proveer en tiempo y forma el fósforo que las plantas precisan, observándose en casos agudos síntomas de deficiencias, algunos de los cuales pueden ser observados a simple vista: crecimiento inicial reducido y lento (plántulas “sin vigor”). El fósforo es muy importante en esta etapa, más que cuando la planta ya está desarrollada. No obstante, debemos siempre tener presente que a veces hay deficiencias que no son directamente observables, las llamamos deficiencias sub-clínicas, pero que afectan el crecimiento general y rendimiento de las plantas expuestas a este estrés.

Dar, T.A., M. Uddin, A. Ali, M.M.A. Khan y T. ul Hassan Dar. 2017. *Understanding the Dynamics of Phosphorus Starvation and Plant Growth*, p. 147-154. En Naeem, M., A.A. Ansari y S.S. Gill (eds.), *Essential Plant Nutrients: Uptake, Use Efficiency, and Management*. ed. Springer International Publishing, Cham. Jacob, J. y D.W. Lawlor. 1991. *Stomatal and Mesophyll Limitations of Photosynthesis in Phosphate Deficient Sunflower, Maize and Wheat Plants*. *J. Exp. Bot.* 42: 1003-1011. Malhotra, H., Vandana, S. Sharma y R. Pandey. 2018. *Phosphorus Nutrition: Plant Growth in Response to Deficiency and Excess*, p. 171-190. En Hasanuzzaman, M., M. Fujita, H. Oku, K. Nahar y B. Hawrylak-Nowak (eds.), *Plant Nutrients and Abiotic Stress Tolerance*. ed. Springer Singapore, Singapore. Mollier, A. y S. Pellerin. 1999. *Maize root system growth and development as influenced by phosphorus deficiency*. *J. Exp. Bot.* 50: 487-497.

Las plantas absorben el fósforo y lo acumulan en sus tejidos, Esta absorción se refleja en la concentración de P acumulado. Las plantas requieren un rango “óptimo” de fósforo para su funcionamiento normal. El riesgo de limitación es más próximo al óptimo que al de toxicidad, ante deficiencias las plantas responden con diferentes ajustes metabólicos y en su funcionamiento:

1. Aumentan la producción de ácidos orgánicos
2. Estimulan la formación de raíces laterales y su longitud.
3. Las plantas pueden establecer asociaciones simbióticas con algunos hongos, que aumentan la capacidad de absorción de fósforo. Las plantas alteran su consumo de energía y a su vez pueden priorizar la asignación de fósforo a funciones esenciales.
4. El fósforo permite a la planta realizar la síntesis y liberación de enzimas específicas para obtener P de la manera orgánica. Las plantas ante deficiencias de fósforo pueden activar genes específicos involucrados en el transporte, captación y removilización de P en los tejidos. Pueden reducir la pérdida de fósforo mediante la exudación o reabsorción de tejidos viejos, entre otras funciones.

Las plantas absorben el fósforo y lo acumulan en sus tejidos de acuerdo a la disponibilidad que se encuentra en el suelo. Esta absorción se refleja en la concentración de P acumulado en los tejidos de las plantas:



Las plantas requieren un rango “óptimo” de fósforo para su funcionamiento normal. El riesgo de limitación es más próximo al óptimo que al de toxicidad, dado que por ser un elemento que suele ser deficiente, las plantas presentan adaptaciones para acumular el fósforo que se absorbe por sobre sus necesidades (a esta acumulación se la suele llamar “consumo de lujo”).

- No obstante, las limitaciones de las plantas, especialmente de aquellas cultivadas, son mucho más frecuentes, y ante deficiencias estas plantas responden con diferentes ajustes metabólicos y en su funcionamiento: Aumentan la producción de ácidos orgánicos, liberados desde las raíces como el ácido cítrico y el ácido málico, con el objeto de solubilizar los fosfatos fijados. Estimulan la formación de raíces laterales y su longitud, de modo de alcanzar al nutriente que en el suelo presenta una movilidad limitada, es decir que pueden modificar no sólo la cantidad de raíces sino la arquitectura o disposición espacial de las mismas. 27

- Simbiosis con micorrizas: las plantas pueden establecer asociaciones simbióticas con un grupo de hongos muy común en los suelos, llamados micorrícicos, que aumentan la capacidad de absorción de fósforo de las raíces al extender su área de absorción.

- Las plantas pueden cambiar procesos de respiración (alteran su consumo de energía) y a la vez ajustar su metabolismo para priorizar la asignación de fósforo a funciones esenciales, como la síntesis de ATP y la producción de biomasa.

- Síntesis y liberación de enzimas específicas, como por ejemplo las fosfatasa ácidas que contribuyen a descomponer el fósforo que se encuentra en la materia orgánica de los suelos.

- Las plantas pueden activar genes específicos involucrados en el transporte y la captación de fósforo, así como en la removilización interna del mismo desde tejidos más viejos hacia tejidos en crecimiento.

- Las plantas pueden reducir la pérdida de fósforo a través de mecanismos como la disminución de la exudación de raíces o la reabsorción de fósforo de tejidos envejecidos.

- Acumulación de antocianinas en tallos y hojas • Se degradan fosfolípidos los cuales son sustituidos en las membranas celulares vegetales por galactolipidos, moléculas con menores contenidos de fósforo

Dar, T.A., M. Uddin, A. Ali, M.M.A. Khan y T. ul Hassan Dar. 2017. *Understanding the Dynamics of Phosphorus Starvation and Plant Growth*, p. 147-154. En Naeem, M., A.A. Ansari y S.S. Gill (eds.), *Essential Plant Nutrients: Uptake, Use Efficiency, and Management*. ed. Springer International Publishing, Cham.

No todas las plantas tienen las mismas necesidades de este nutriente por el fósforo absorbido, las plantas direccionan diferentes proporciones de este P en los órganos cosechables, esta proporción depende de la especie y del órgano cosechado.

Algunos cultivos tienen altísimos requerimientos de P, otros presentan bajos requerimientos, pero al tener altos índices de cosecha se extrae mayor cantidad.

Las especies cultivadas precisan absorber cantidades diferentes de fósforo para lograr determinado crecimiento en biomasa, no todas las plantas tienen las mismas necesidades de este nutriente. Además, del fósforo absorbido, las plantas direccionan diferentes proporciones de este P en los órganos cosechables; esta proporción, denominada índice de cosecha, depende de la especie y del órgano que se coseche, claramente la composición de un grano es muy diferente a la que puede tener una hoja, un fruto o una raíz:

Requerimientos (kg ton<sup>-1</sup> de grano, de fibra o de forraje en base seca) e índice de cosecha de "P"

Cultivo	Requerimiento (kg t <sup>-1</sup> )	Índice de cosecha
Trigo	5,0	0,80
Cebada	4,0	0,76
Maíz	4,0	0,76
Sorgo granífero	4,4	0,82
Arroz	4,0	0,84
Soja	7,0	0,88
Girasol	4,0	0,84
Colza	15,0	0,76
Maní	7,0	0,57
Algodón	20,0	0,60
Café	2,0	0,25
Té	3,0	0,67
Tabaco	9,0	0,67
Alfalfa	2,5	1,00
Raigrás	2,7	1,00
Festuca	3,0	1,00
Pasto Ovillo	2,7	1,00

Requerimiento: cantidad de fósforo necesario para producir granos (maíz, soja), de fibras (algodón) o biomasa aérea (forrajes en pasturas, hojas secas en té y tabaco)

Índice de cosecha: proporción del P que se extrae en las estructuras cosechables (granos, fibras, hojas) en relación con el total requerido para su crecimiento. Algunos cultivos como el algodón tienen altísimos requerimientos de P por tonelada producido. Cultivos como el maíz y el trigo presentan bajos requerimientos por unidad de grano producido, pero el índice de cosecha es alto en estos cultivos, lo que desemboca en grandes cantidades extraídas y exportadas desde los suelos.

Ciampitti, I.A. y F.O. García. 2007. *Requerimientos nutricionales. Absorción y extracción de macronutrientes y nutrientes secundarios. I. Cereales, oleaginosos e industriales. IPNI. Informaciones Agronómicas 33. Archivo Agronómico 11: 13-16.*