

# Fertilizantes para la Agricultura 2025

**Mike McLaughlin**

Fertiliser Technology Research Centre, Waite Research Institute, University of Adelaide

CSIRO Land and Water



<http://www.adelaide.edu.au/fertiliser/>

[www.csiro.au](http://www.csiro.au)



# Agradecimientos

Fien Degryse  
Roslyn Baird  
Rodrigo Coqui da Silva  
Colin Rivers  
Bogumila Tomczak  
Ashleigh Broadbent

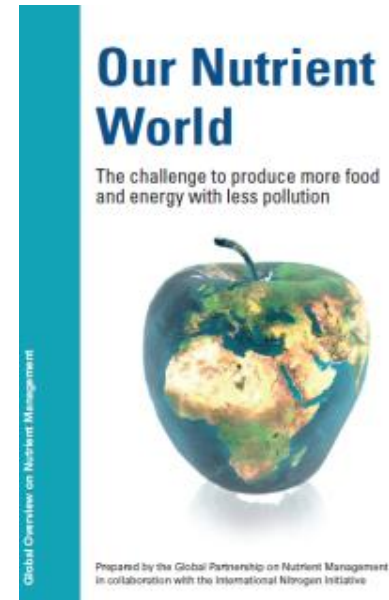
Daniel Khajavi  
Bob Holloway  
Sam Stacey  
Sola Ajiboye  
Roger Armstrong  
Caroline Johnston

# Manejo de Nutrientes



# Reservas Globales de Nutrientes

- Reservas de N ilimitadas
- Reservas de P ~ 350-400 años
- Reservas de K ~ 300 años
- Reservas de S > 500 años
- Reservas de Zn ~ 20 años



Sutton M.A. et al. (2013) Our Nutrient World: The challenge to produce more food and energy with less pollution, Global Overview of Nutrient Management, Centre for Ecology and Hydrology, Edinburgh on behalf of the Global Partnership on Nutrient Management and the International Nitrogen Initiative.

# Eficiencia de nutrientes = viabilidad y rentabilidad del productor



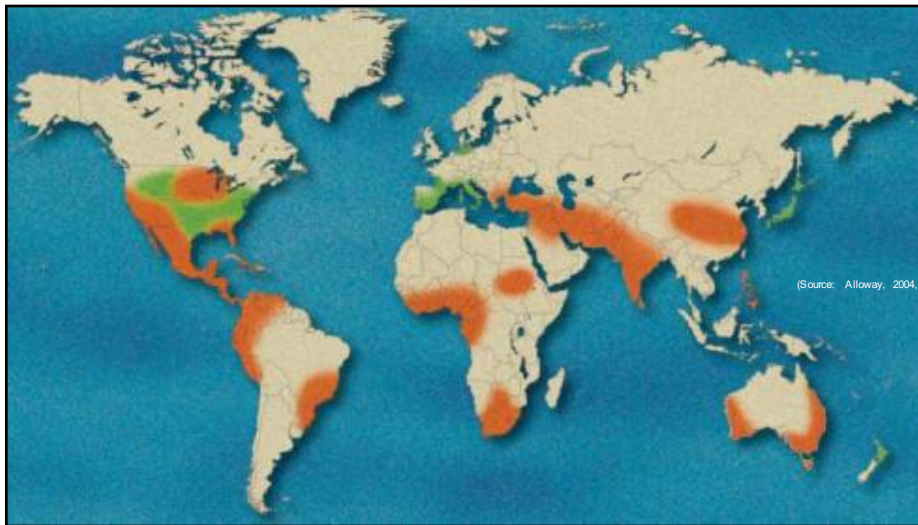
# Preocupaciones globales respecto a las pérdidas de nutrientes

- Movimiento de nutrientes a cursos de agua

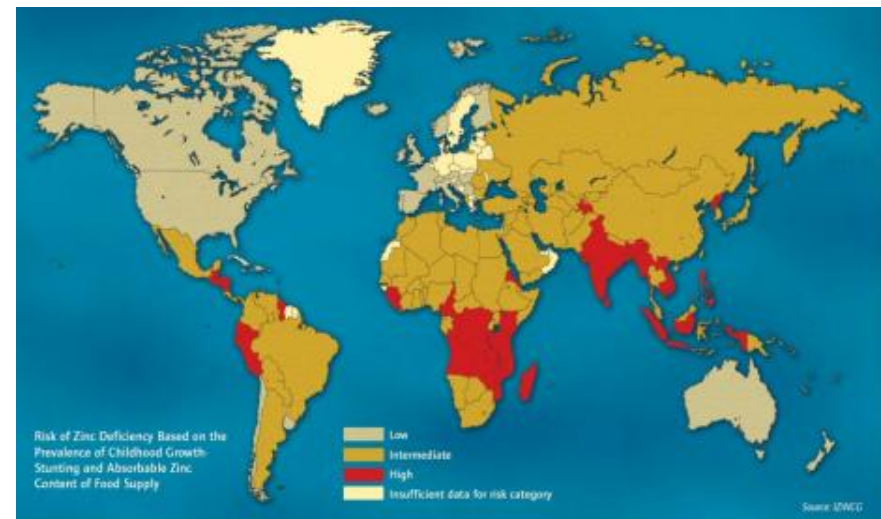


- Emisión de gases de efecto invernadero a la atmósfera

# Distribución geográfica de suelos deficientes en Zn y deficiencias de Zn en humanos



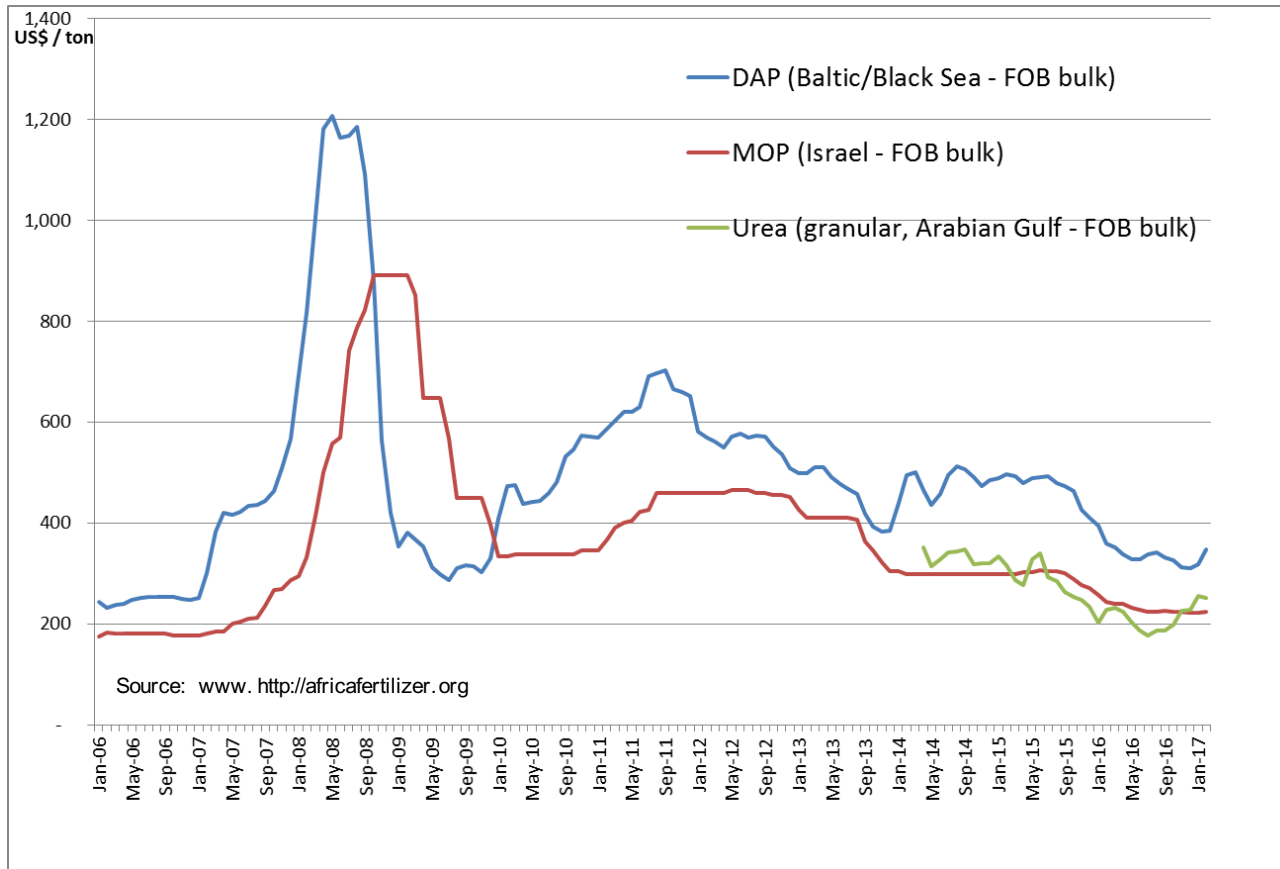
Suelos deficientes en Zn



Deficiencia de Zn en humanos

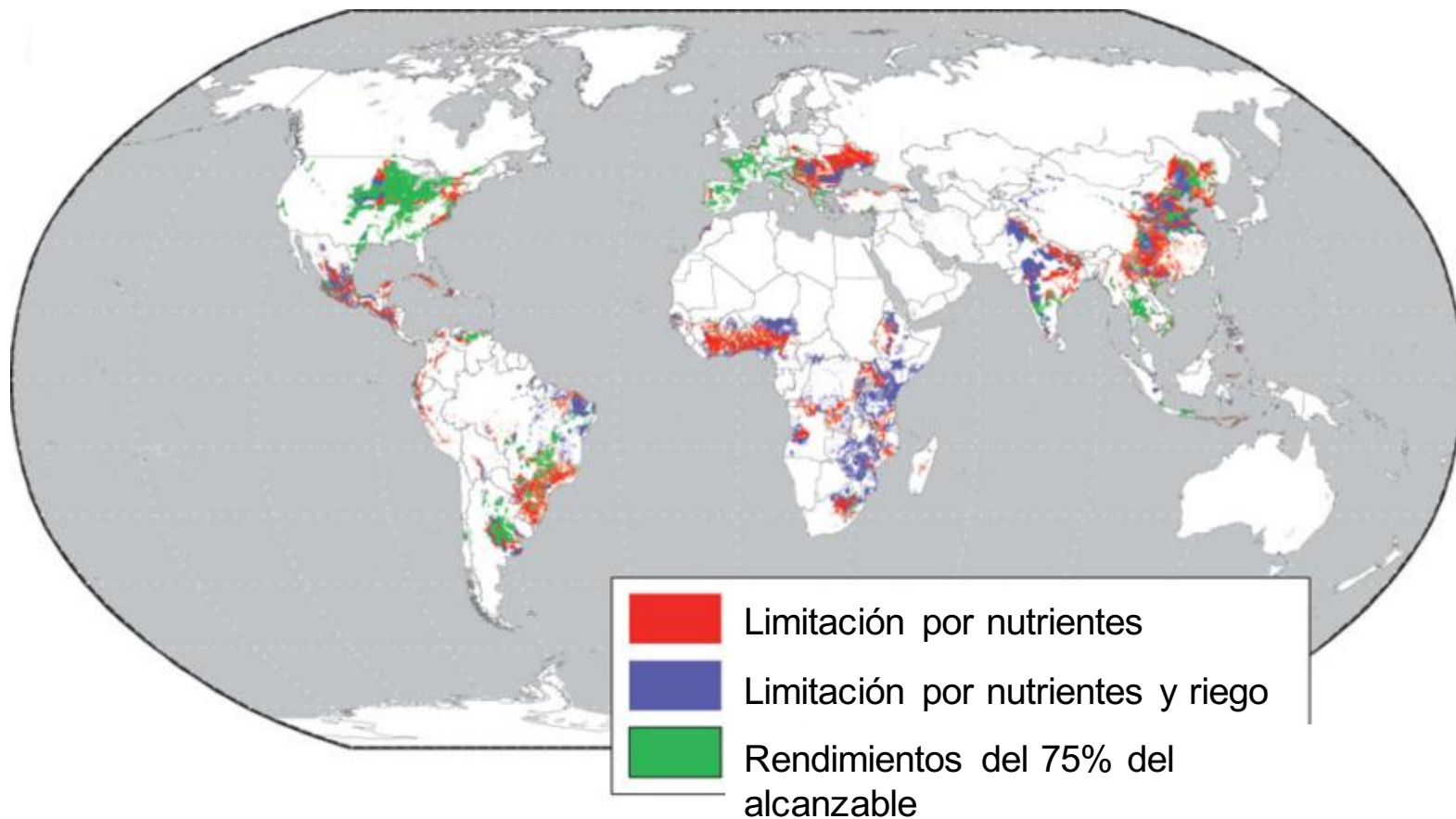


# Cambios de precios globales de nutrientes

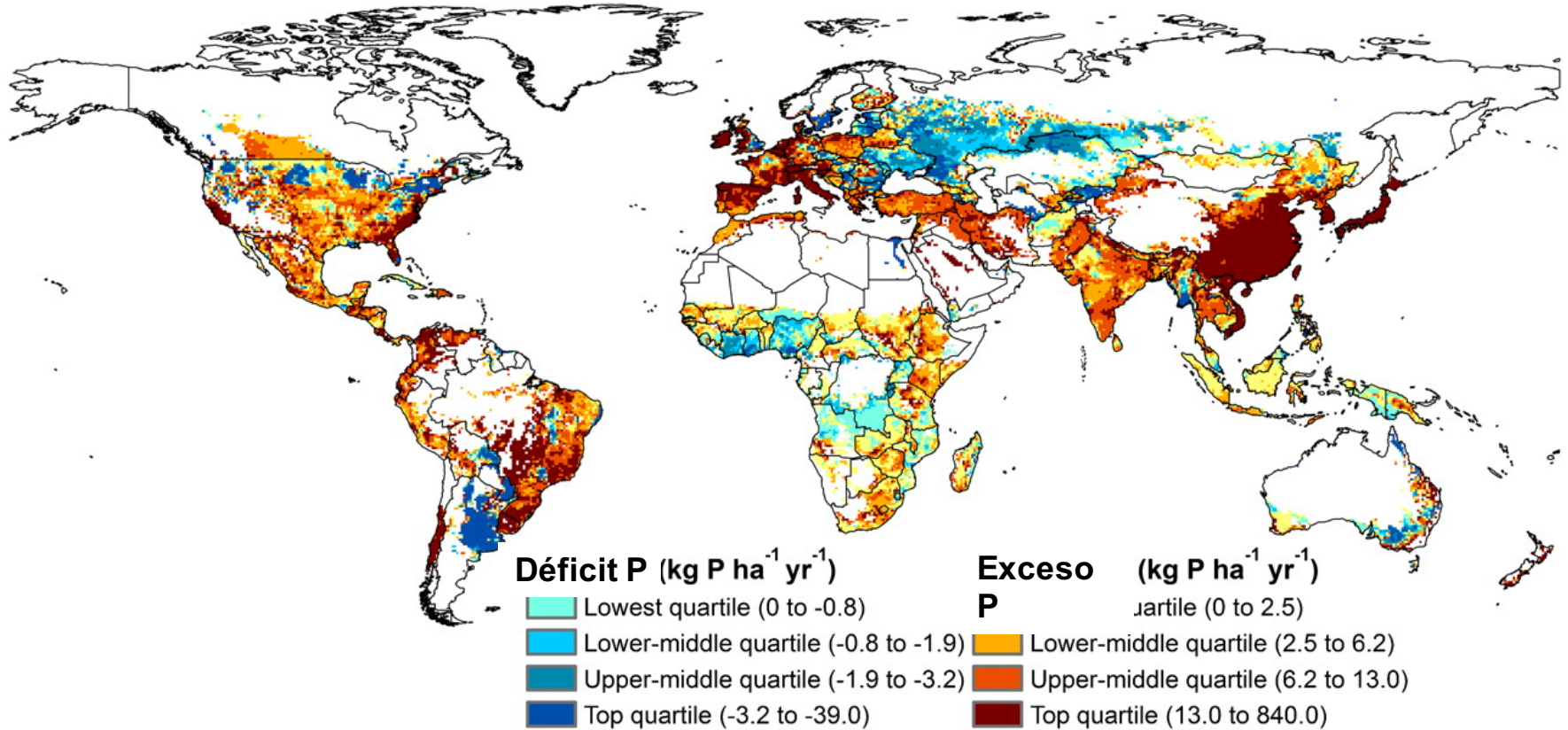




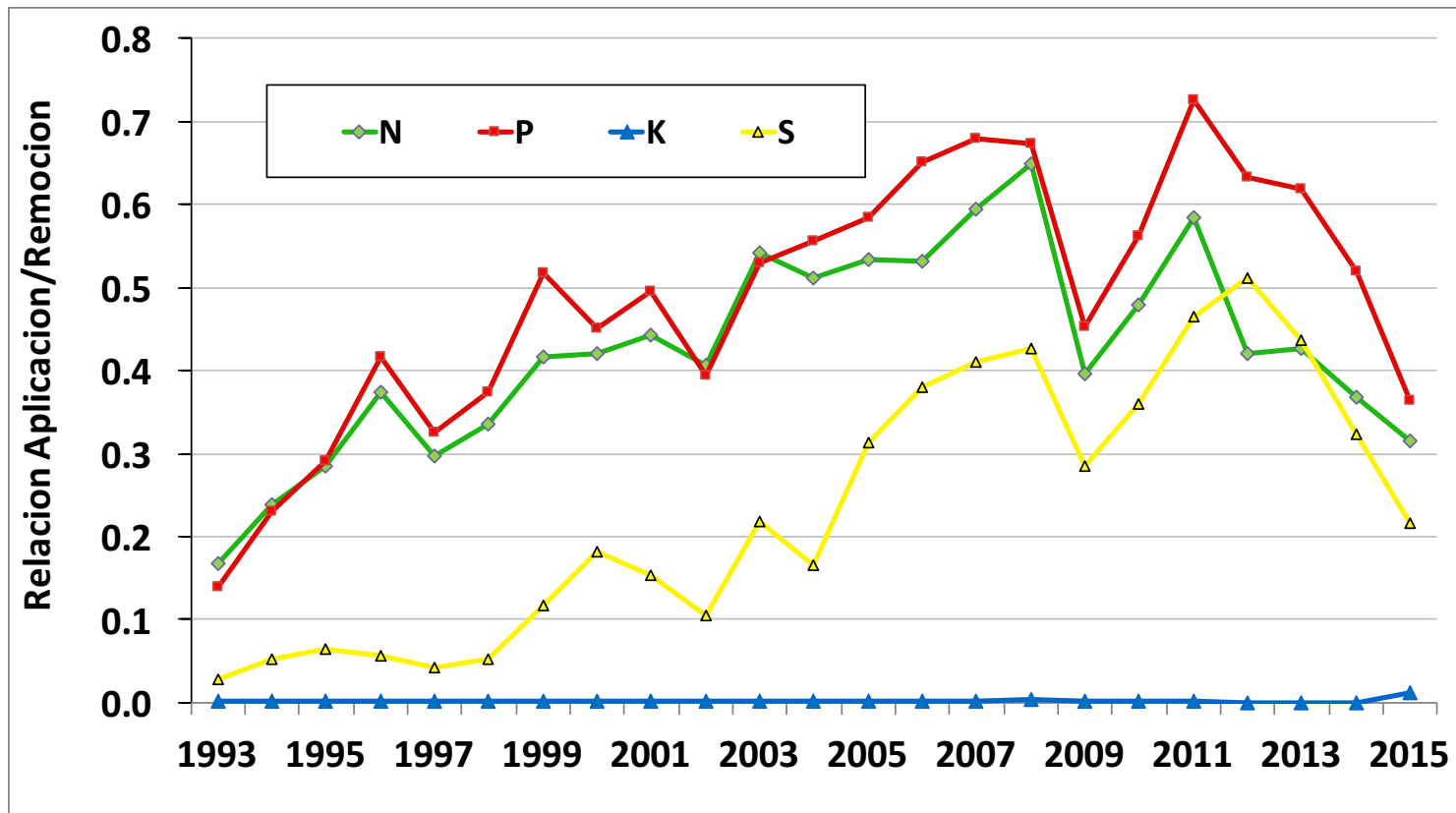
# Limitaciones regionales de rendimiento de arroz, maíz y trigo



# Desbalances globales de fosforo



## Desbalances de nutrientes en Argentina para soja, maíz, trigo, girasol, cebada y sorgo



## Necesidad de mejores fertilizantes

- Los precios de los fertilizantes son volátiles y aumentarán con el tiempo
- Las brechas de rendimiento de los cultivos se pueden cerrar aumentando el uso de nutrientes en el 75% de los cultivos del mundo
- Las preocupaciones medioambientales están aumentando y las pérdidas en el aire y las aguas deben ser reducidas
- La rentabilidad de los agricultores está disminuyendo y las eficiencias de los insumos deben maximizarse
- En Argentina, los nutrientes se remueven en cantidades mayores que las que se aplican en los fertilizantes, por lo que se necesitan más fertilizantes y fertilizantes más efectivos

# La cadena de innovación de los fertilizantes



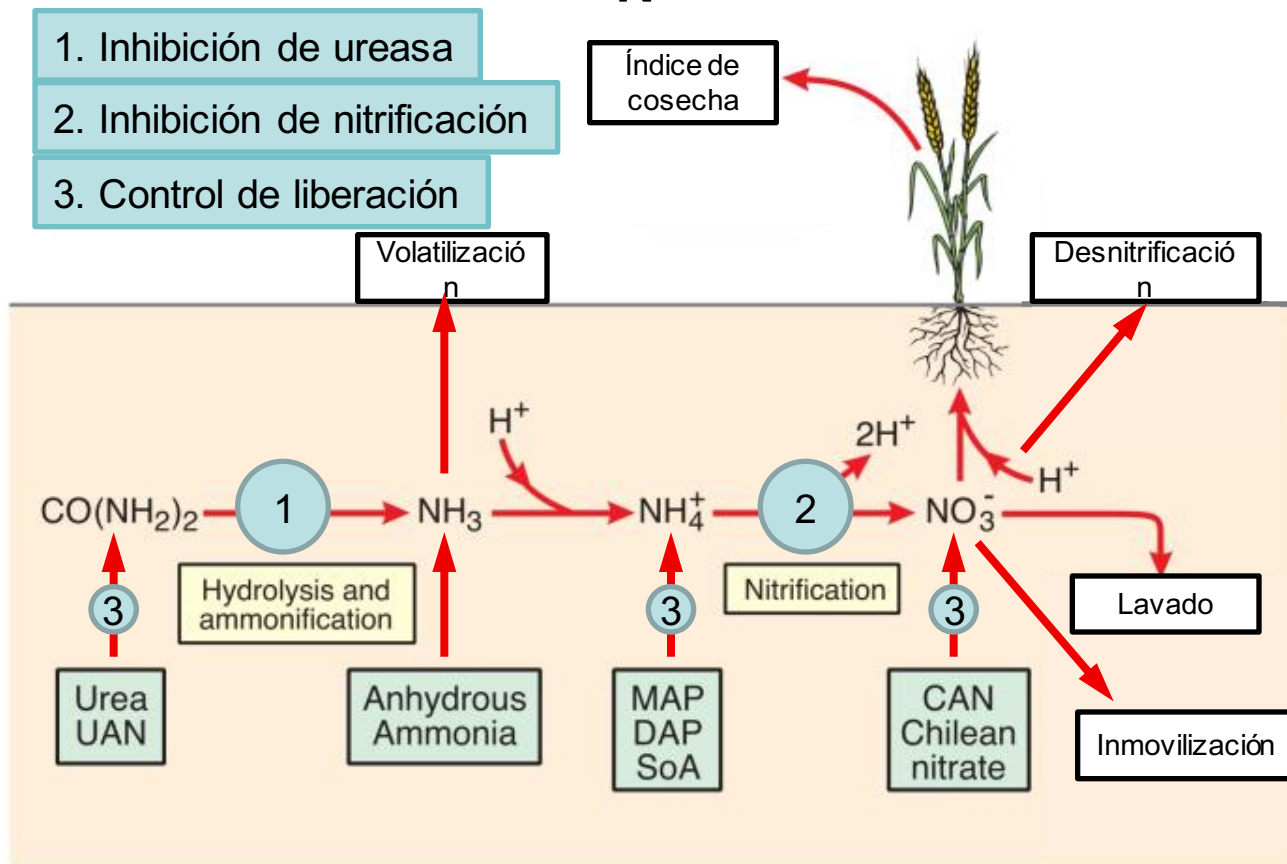
~10 años



# Nitrógeno

# Reacciones importantes para la eficiencia de uso del

**N**

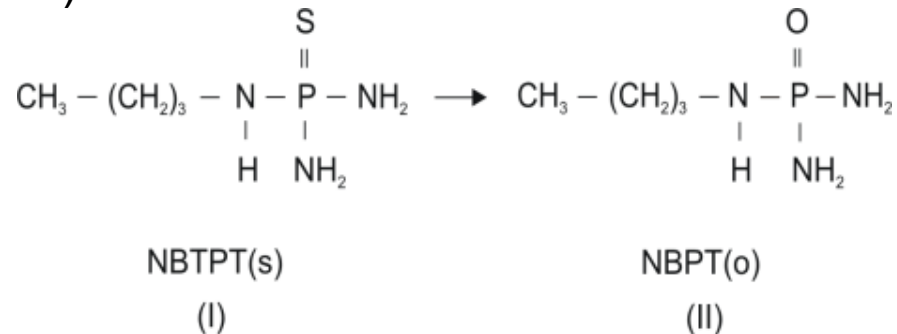




1

## Inhibición de ureasa– tecnologías actuales

- Reducir la conversión de urea a amonio
- Una tecnología antigua – principalmente fosforoamidas usadas comercialmente pero muchos químicos pueden inhibir ureasa
- El químico más comúnmente usado es *N*-(*n*-butyl)-*phosphoric triamide* (NBPT) (*n*-butil triamida fosfórica) (Agrotain)



Source: Chien S.H., Prochnow L.I., Cantarella H. (2009) Recent developments of fertilizer production and use to improve nutrient use efficiency and minimize environmental impacts. *Advances in Agronomy* 102:267-322.

2

## Inhibición de nitrificación – tecnologías actuales

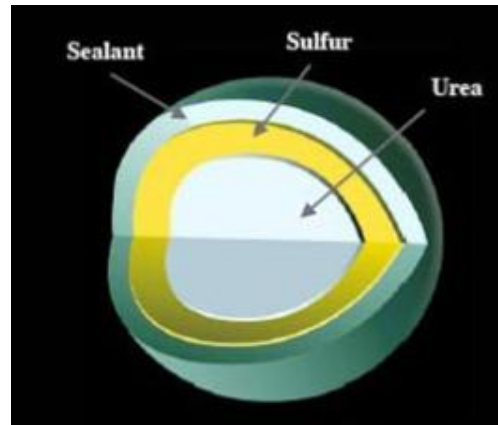
Nombre común	Químico	Nombre comercial	Inhibición	Reducción de N <sub>2</sub> O
Nitrapyrin	2-chloro-6-trichloromethyl pyridine	N-Serve	82% al día 14	60-93%
DCD	Dicyandiamide	Guardian	53% al día 14	50-92%
DMPP	3,4-dimethyl pyrazole phosphate	ENTEC	+4 semanas	51%
ATS	Tiosulfato de amonio	THIO-SUL	Algo	?

Fuente: IPNI

3

## Control de liberación de N – tecnologías actuales

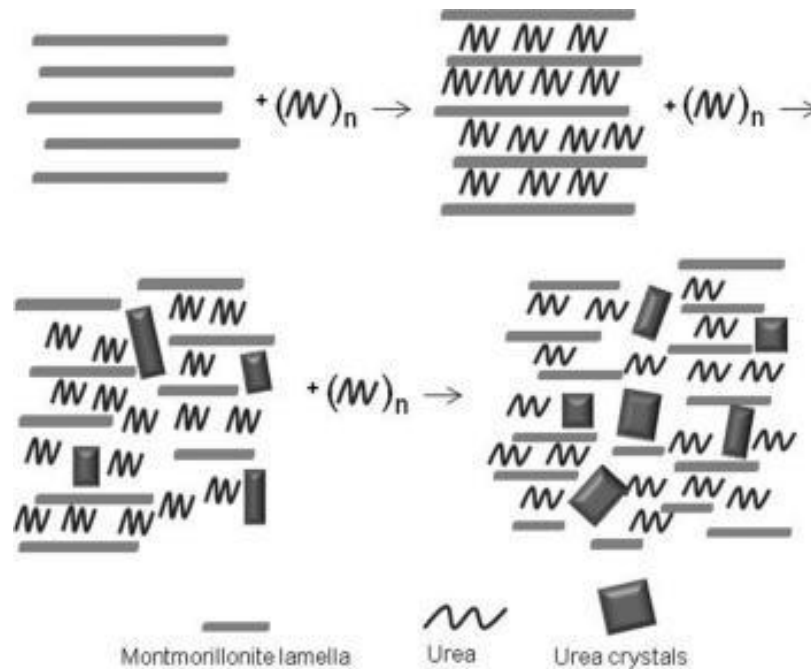
- Urea recubierta de S
- Formulaciones recubiertas de polímeros
- El principio es liberar lentamente el N del granulo



3

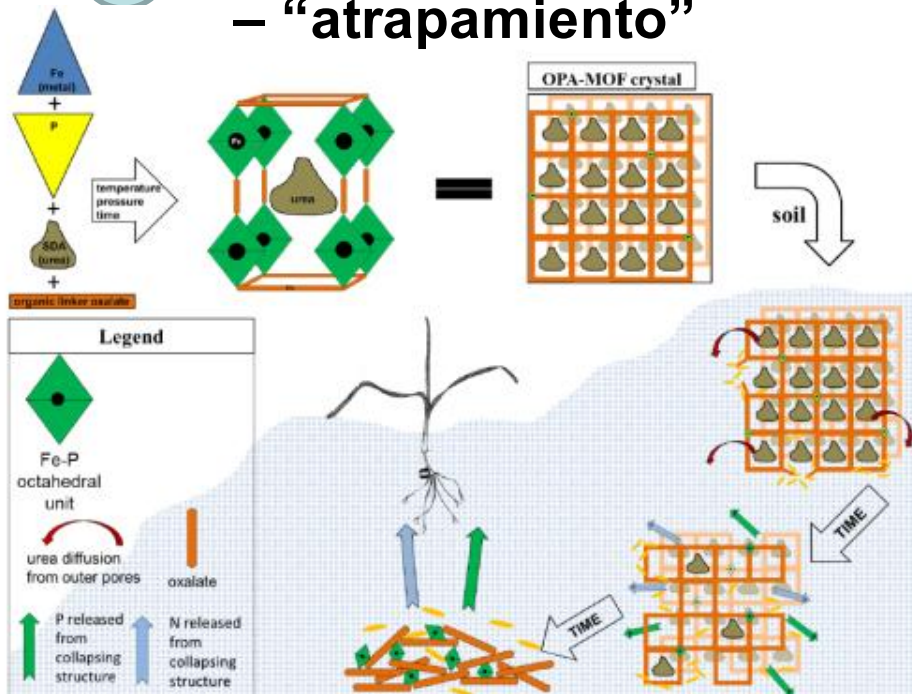
## Materiales nuevos para la liberación lenta de N – “atrapamiento”

- Nanocompuestos p.e. urea/montmorillonita



3

## Materiales nuevos para la liberación lenta de N – “atrapamiento”

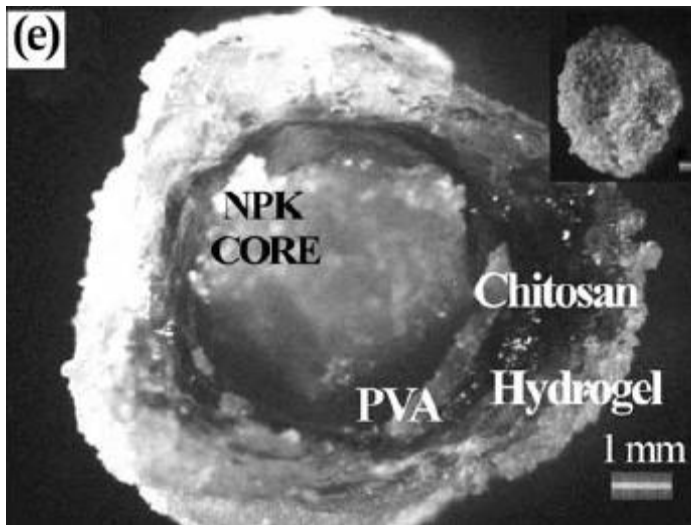


**Fig 1. Conceptual Diagram.** The conceptual diagram describes OPA-MOF synthesis, and bacterial processing and mineralisation of the structurally incorporated oxalate when applied to soil; plant nutrient release is proposed as a result of the microbially induced structural collapse of the mineral, where N is delivered from pore-residing guest molecule urea and P from the Fe-P octahedral units that form the framework.

- Estructuras metal-orgánicas p.e. FeP/urea

3

## Materiales nuevos para la liberación lenta de N – nuevos recubrimientos

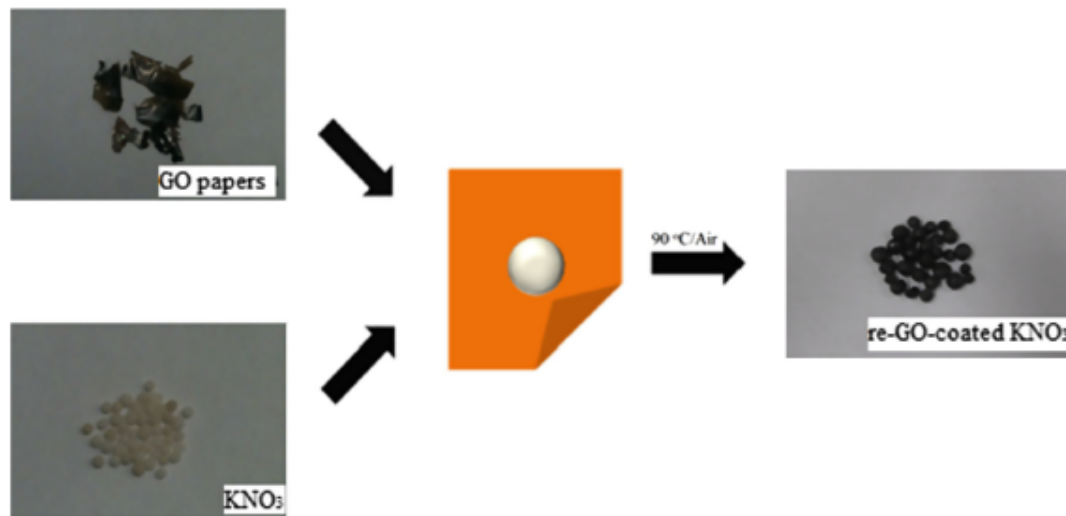


- Hidrogeles p.e. PVA/chitosan

3

## Materiales nuevos para la liberación lenta de N - recubrimientos

- *Graphene* – Estructura de carbono 2D con un área superficial muy alta y capacidad de ser funcional para contener cationes o aniones



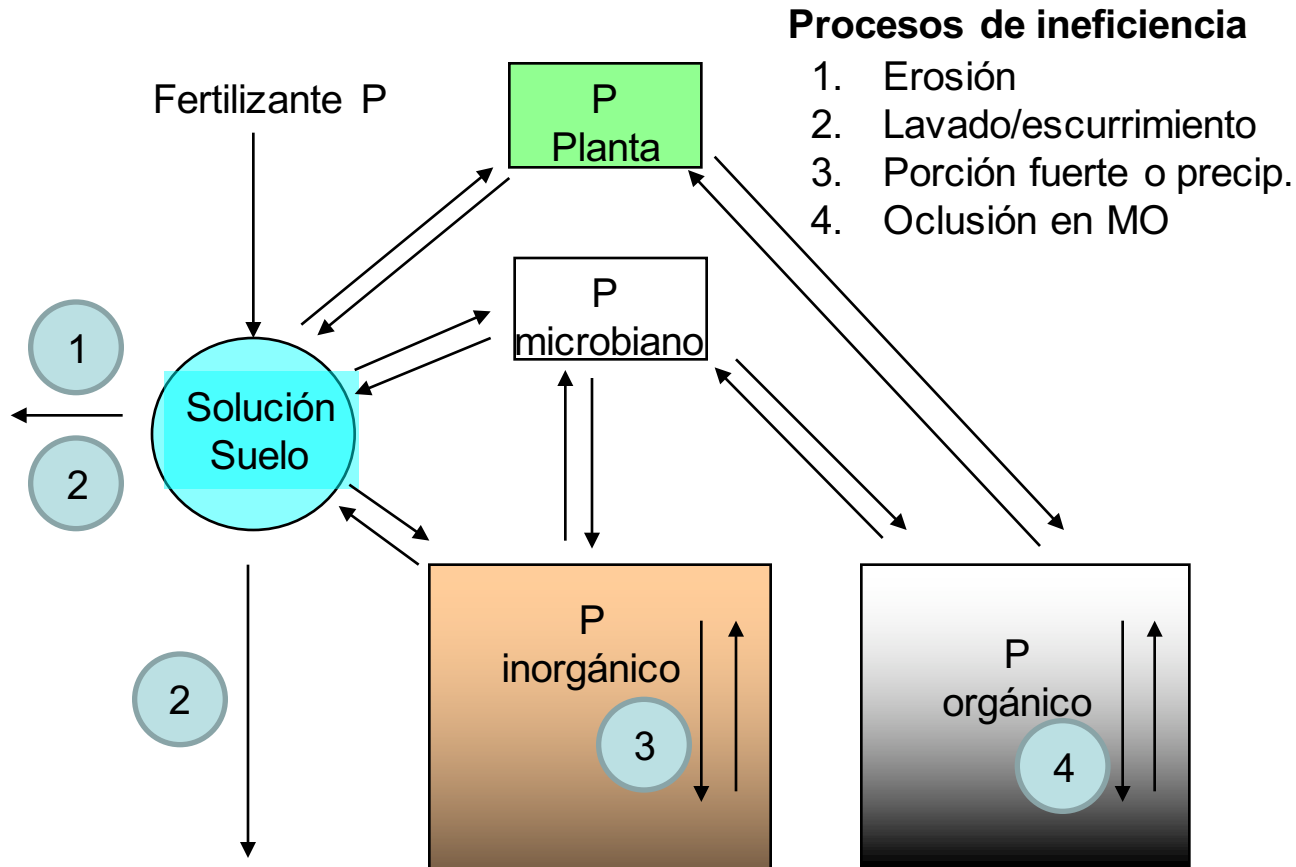


## Nuevas tecnologías de liberación lenta de N Síntesis

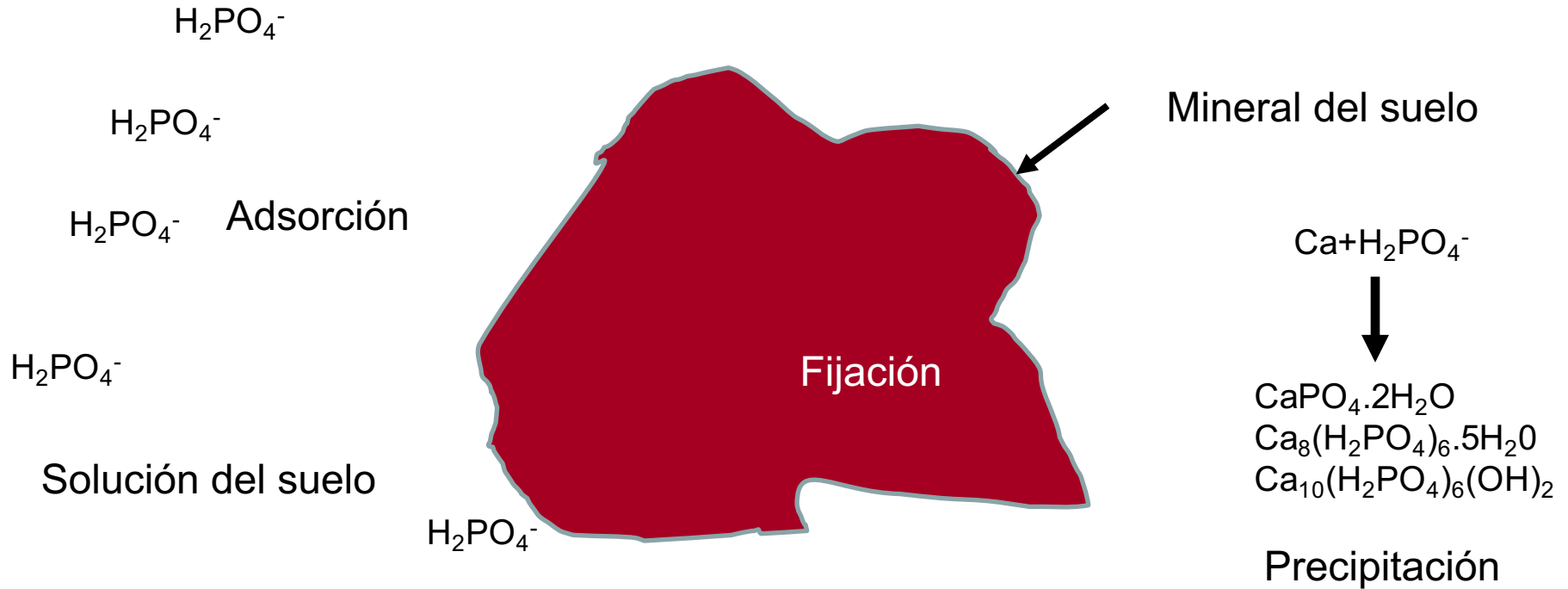
- La mayoría aún se encuentra en la fase de laboratorio - ciencia de los materiales, fabricación y pruebas sencillas de liberación
- Pocas han sido sometidas a pruebas en el suelo durante períodos prolongados
- Pocas han sido evaluadas en relación a los beneficios para las plantas
- Ninguna ha sido sometida a evaluaciones intensivas a campo (por lo menos no se ha informado)
- En muchos casos, los costos de materiales y de fabricación de algunas tecnologías siguen siendo demasiado elevados para la liberación comercial

# Fósforo

# Mejorando la eficiencia del fertilizante fosfatado en el suelo



# Adsorción, “fijación” y precipitación



## Eficiencia de fertilizantes fosfatados en suelos

- Tanto la adsorción como las reacciones de precipitación reducen la eficiencia del fertilizante fosfatado, la última más probable alrededor de gránulos de fertilizante o puntos de inyección de fluidos
- La "fijación" no es irreversible, pero la cinética de reabastecimiento de P "fijado" puede limitar el crecimiento del cultivo
- Las formulaciones de fertilizante fosfatado de eficiencia mejorada serán más beneficiosas en los suelos que reciben fertilizante fosfatado por primera vez, en suelos con bajo P y alta capacidad de sorción de P, y disminuirán (en la mayoría de los suelos) a medida que se acumulan las aplicaciones de P

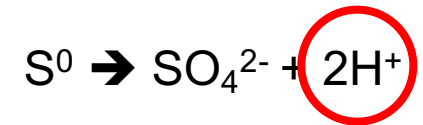
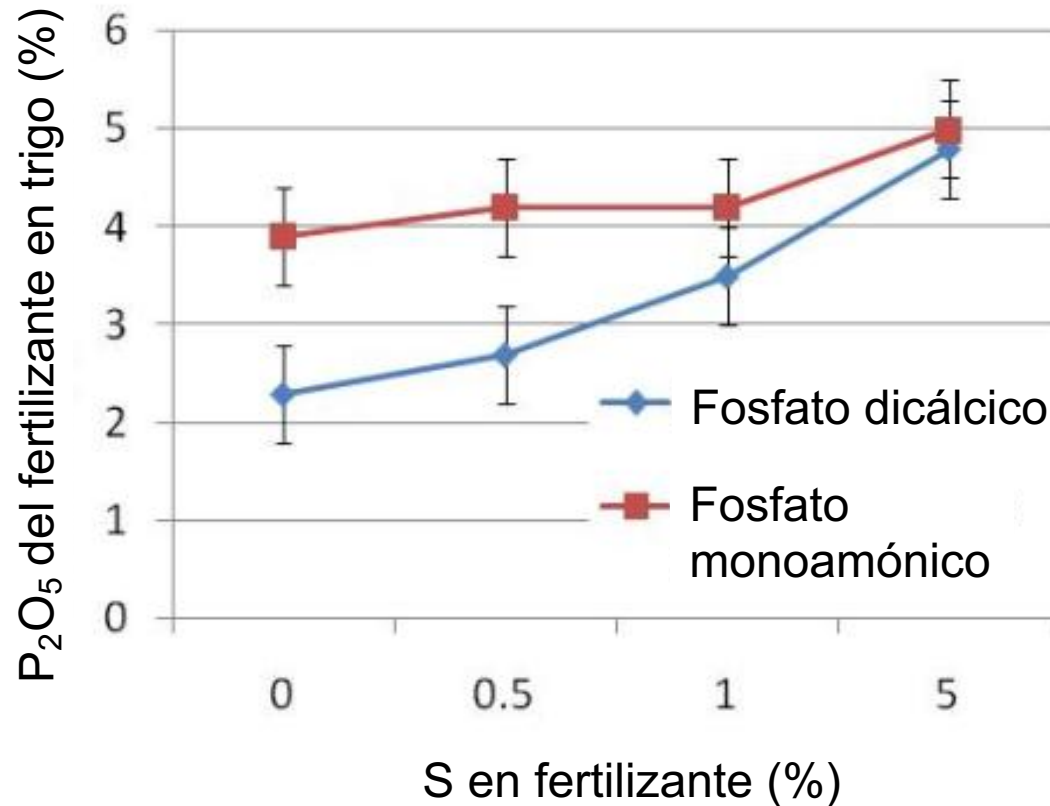
3

## Reduciendo reacciones de adsorción fuerte o precipitación

- a) Modificar el pH alrededor del granulo de fertilizante
- b) Afectar las reacciones de adsorción o precipitación
- c) Liberación lenta de P a partir de gránulos

3  
a

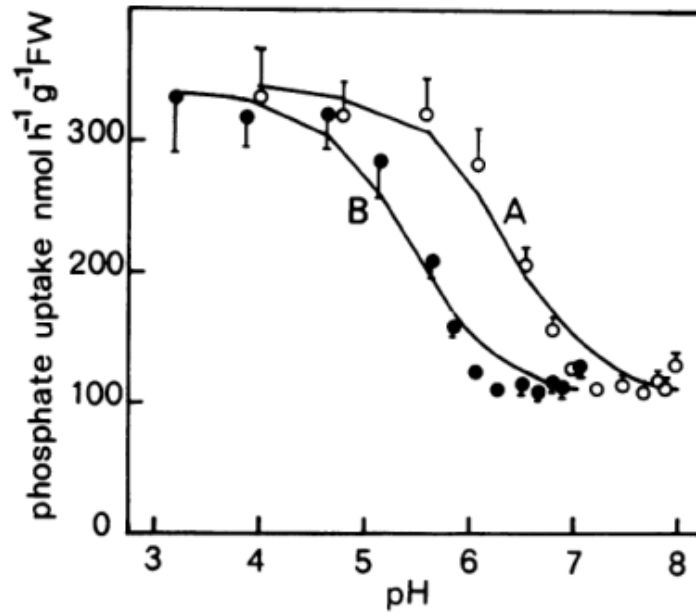
## Incrementando la eficiencia de P – modificando el pH con S<sup>0</sup>





3  
a

## Incrementando la eficiencia de P – reduciendo el pH



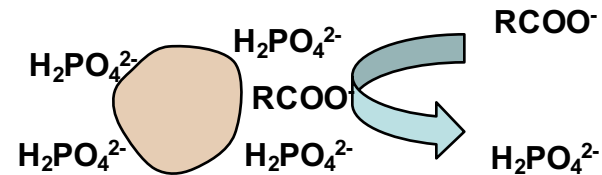
Las raíces de las plantas prefieren el ion  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$

FIG. 6.  $^{32}\text{P}$ i uptake by corn root segments at various pH values with  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  concentration constant in the walls. The data are plotted *versus* the pH in the medium (O, and curve A) or in the walls (●, and curve B).

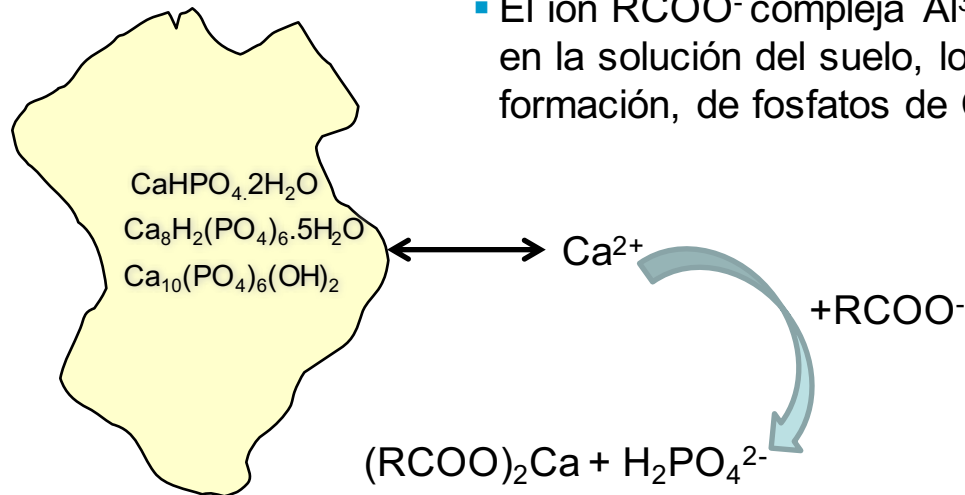
3  
b

## Incrementando la eficiencia de P – modo de acción de quelatos

- El ion  $\text{RCOO}^-$  compite con  $\text{H}_2\text{PO}_4^{2-}$  por sitios de sorción



- El ion  $\text{RCOO}^-$  compleja  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  o  $\text{Fe}^{n+}$  y reduce la actividad catiónica en la solución del suelo, lo que favorece la disolución, o previene la formación, de fosfatos de Ca (o Al/Fe) fácilmente solubles



3  
b

## ¿Puede la formación de complejos de Al, Ca o Fe mejorar la eficiencia del fertilizante fosfatado?

**Coberturas probadas en MAP:** NTA

Tiron

**Coberturas al 1%**

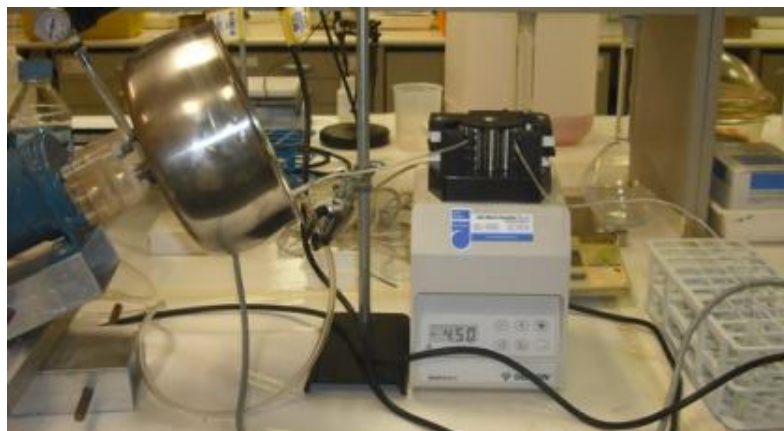
Citrato

Acido cítrico

Sulfato de amonio

Avail (comercial)

Pmax (comercial)

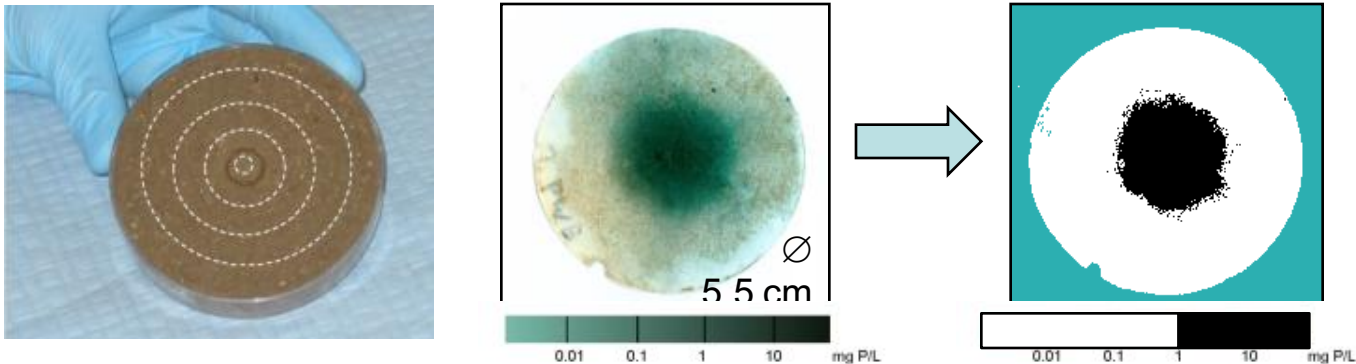


SPS y SPS recubiertos con quelatos orgánicos basados en húmicos (“TopPhos”) también comparados

3  
b

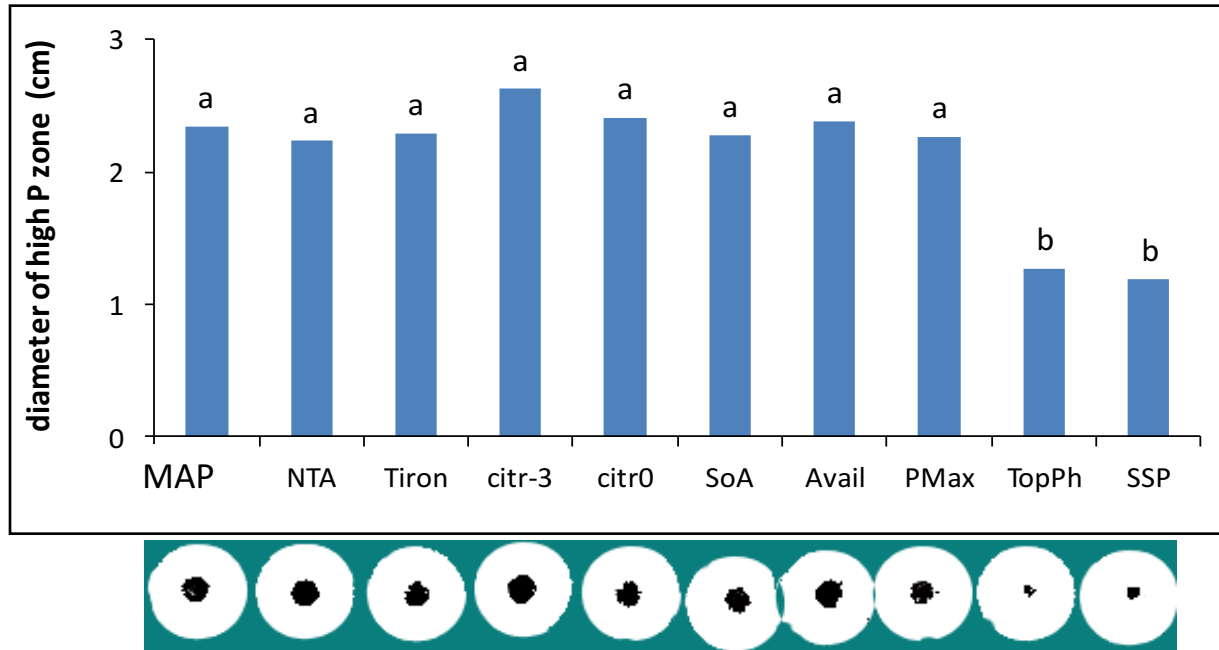
## Evaluación de difusión de P de los productos

- Oxisol y suelo calcáreo (Inceptisol)
- Tratamientos: Control (no P), 10 tratamientos con MAP granulado en el centro del plato (= control, 7 recubrimientos en MAP, TopPhos y SSP)
- Visualización P a 1, 7 y 50 días
- Solubilidad de P, valores E (P intercambiable isotópicamente) y concentraciones totales (para 3 círculos concéntricos de suelo) al día 50



3  
b

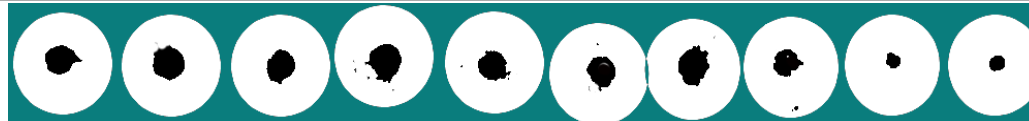
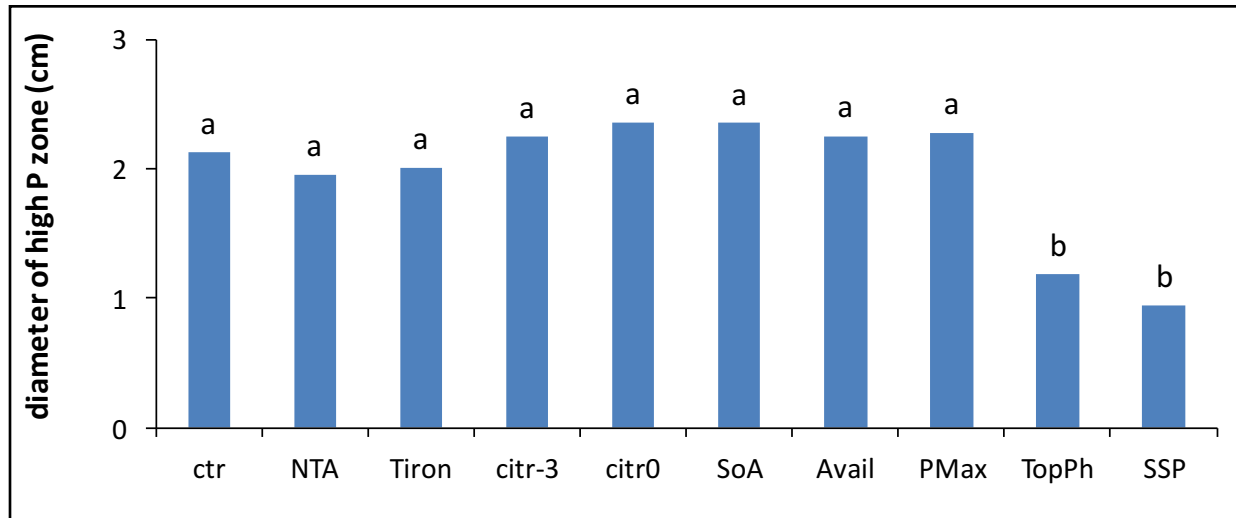
## Resultados – poco/sin efecto de difusión de P en Oxisol



- Tratamientos de MAP: diámetro ~2.4 cm
- TopPhos y SFS: diámetro ~ 1.3 cm

3  
b

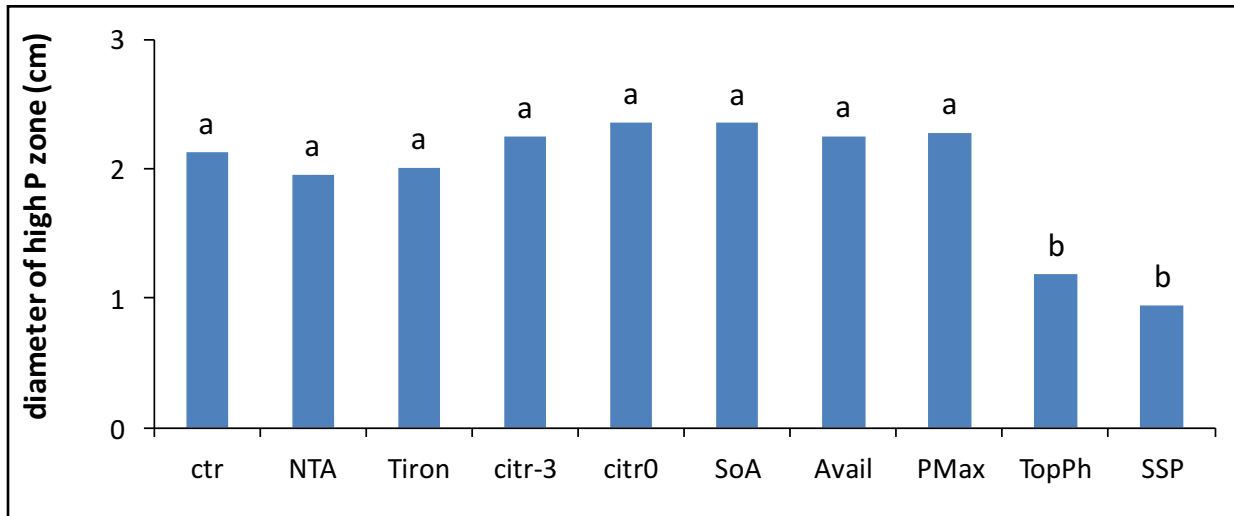
## Resultados – poco/sin efecto en la P difusión en suelo calcáreo (Calcarosol)



- Tratamientos de MAP: diámetro ~2.2 cm
- TopPhos y SFS: diámetro ~ 1.1 cm

3  
b

## Resultados – poco/sin efecto en la P difusión en suelo calcáreo (Calcarosol)

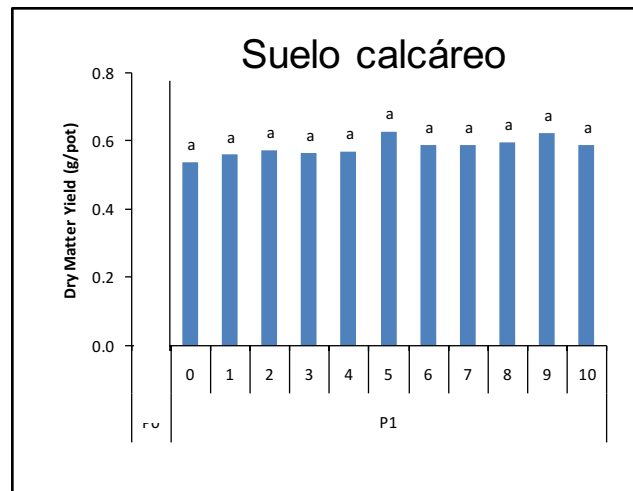
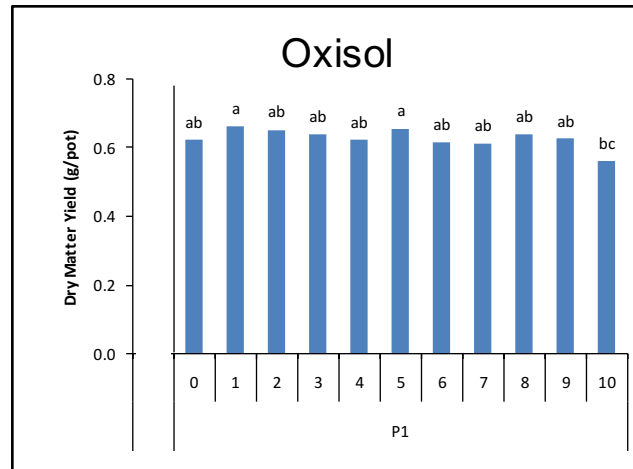


- Tratamientos de MAP: diámetro ~2.2 cm
- TopPhos y SFS: diámetro ~ 1.1 cm



3  
b

## Resultados – sin efecto en la disponibilidad de P para las plantas



- 0 none = solo MAP
- 1 NTA
- 2 Tiron
- 3 Citr-3
- 4 Citr-2
- 5 Citr0
- 6  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$
- 7 Avail
- 8 PMax
- 9 TopPhos
- 10 SSP

3  
b

## ¿Puede la formación de complejos de Al, Ca o Fe mejorar la eficiencia del fertilizante fosfatado?

- Con una tasa de recubrimiento del 1% en los gránulos de MAP, todos los compuestos complejantes de metal no tuvieron efecto sobre la difusión de P o la absorción de P por el trigo en suelos deficientes en P
- Incluso a dosis de recubrimiento muy elevadas (100%) de ligandos complejantes de metales (citrato y Avail) en gránulos de MAP, el grado de la difusión de P no se modificó significativamente

3  
b

## ¿Puede la formación de complejos de Al, Ca o Fe mejorar la eficiencia del fertilizante fosfatado?

¿Por qué los recubrimientos no tienen efecto? Un cálculo rápido:

¿Puede el complejo de ligando una cantidad sustancial de Al, Ca o Fe? **NO**

- 135 mmol Ca / kg cambiabile en el suelo Calcáreo
- Zona de difusión: 1 cm de radio o 6 g de suelo 1 mmol de Ca
- 0,3 mg de producto, capacidad de complejación de aproximadamente 2 mmol / g

⇒ 0.0006 mmol de grupos complejantes

¿Pueden bloquear una cantidad significativa de sitios de sorción?

- Sorción en ambos suelos saturados cerca de 30 mmol P / kg
- Zona de difusión: 1 cm de radio (~ 6 g de suelo) 0.18 mmol de sitios **NO**

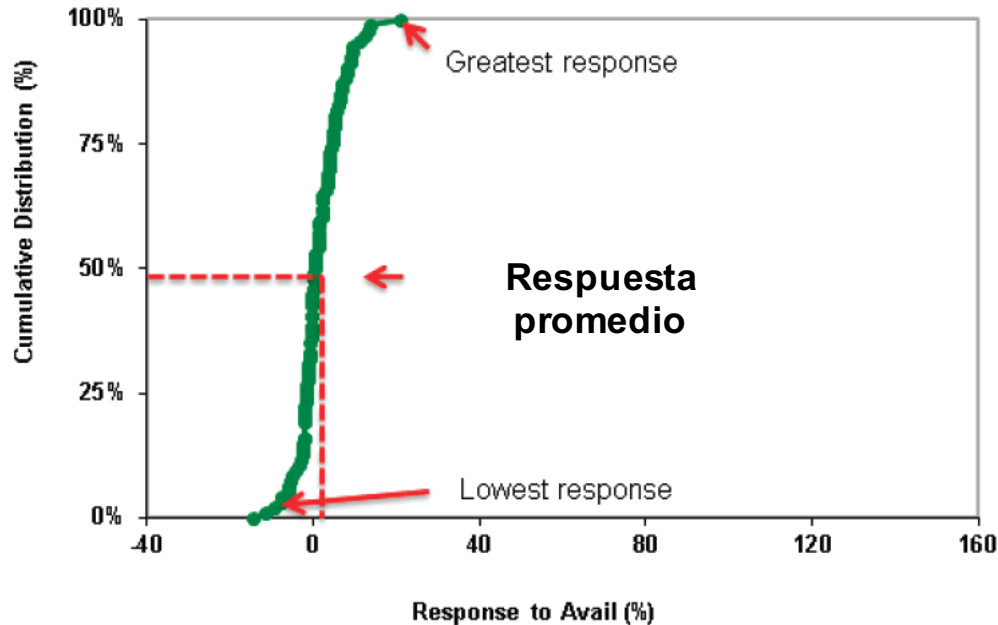
⇒ 0,0006 mmol de grupos complejantes

Es poco probable que complejar ayuda a la efectividad del P previniendo la asociación con Al, Ca o Fe

3  
b

## ¿Puede la formación de complejos de Al, Ca o Fe mejorar la eficiencia del fertilizante fosfatado?

Avail -- Very Reliable Trials (92)



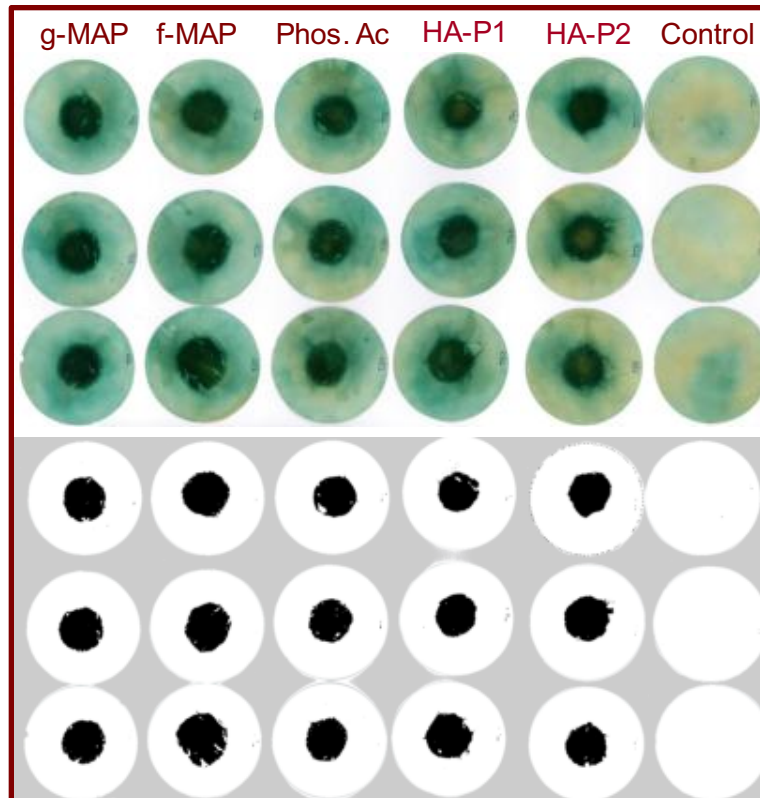
Un meta-análisis de 92 ensayos de campo concluyo que hay poco efecto en la producción de cultivos debido a una mayor disponibilidad de P

Fig. 8. The distribution frequency of plant yield responses to copolymer + P fertilizer expressed as a decrease or increase (%) relative to control for a subset of trials that are defined as very reliable trials (Edmeades and McBride, personal communication, 2012).

Chien SH, Edmeades D, McBride R, Sahrawat KL (2014) Review of maleic-itaconic acid copolymer purported as urease inhibitor and phosphorus enhancer in soils. *Agronomy Journal* 106: 423-430.

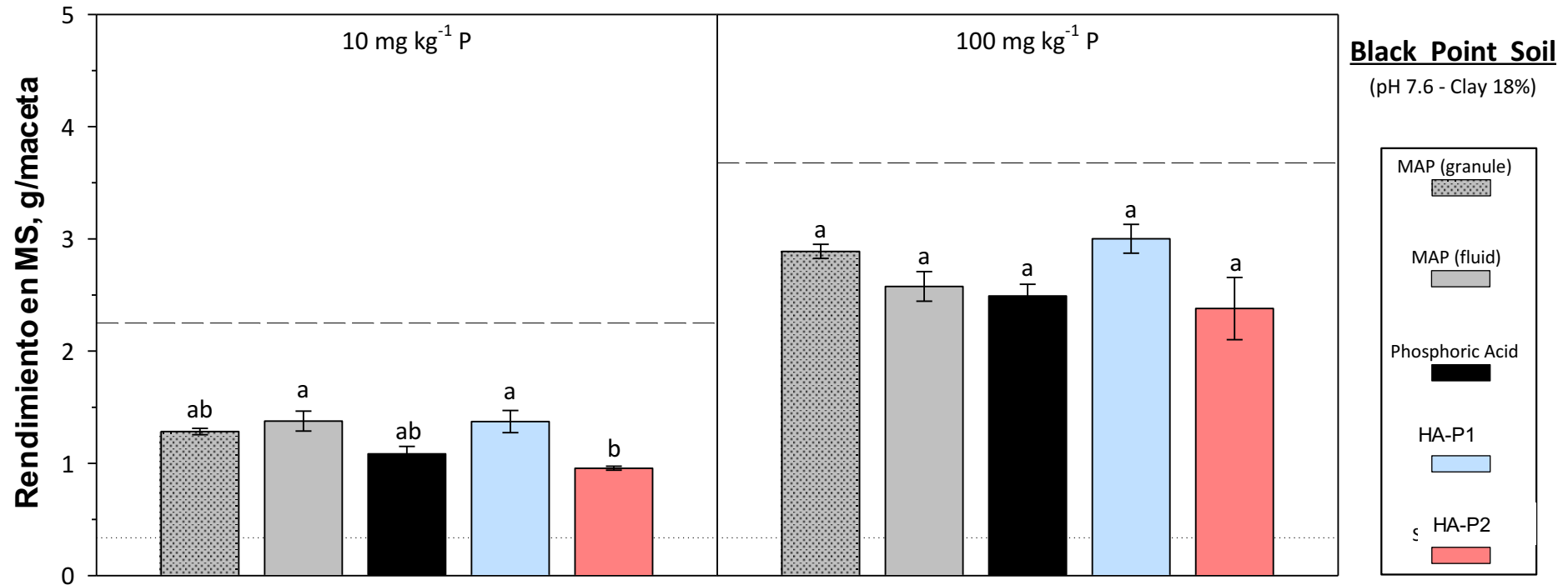
3  
b

¿Puede la formación de complejos de Al, Ca o Fe con ácidos fúlvicos/húmicos mejorar la eficiencia del fertilizante fosfatado?



3  
b

## ¿Puede la formación de complejos de Al, Ca o Fe con ácidos fúlvicos/húmicos mejorar la eficiencia del fertilizante fosfatado?



3  
b

## Incrementando la eficiencia de P – complejantes

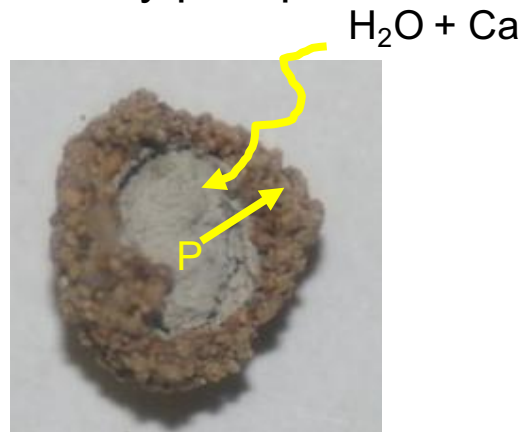
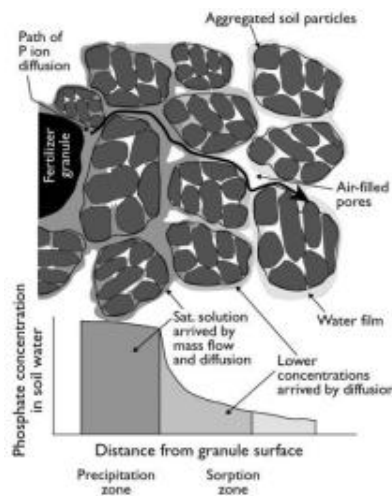
- No exitosos (hasta la fecha).....



3  
b

## Incrementando la eficiencia de P – reduciendo la precipitación de Ca-P

- Al aplicarse al suelo, gránulos de fertilizantes absorben la solución del suelo
- En suelos calcáreos, la solución está saturada con  $\text{Ca}^{2+}$
- El Ca “encuentra” el P que se solubiliza, y precipita Ca-P





3  
b

## Incrementando la eficiencia de P – reduciendo la precipitación de Ca-P

- Ion común - la adición de sulfato en exceso (Olatuyi et al., 2010) para reducir las actividades de  $\text{Ca}^{2+}$  y estimular la liberación de P o minimizar la precipitación
- Otros aniones podrían interrumpir la precipitación de P pero si se agregan grandes cantidades al fertilizante, diluirán el contenido de nutriente
- Modificación de la forma física de P aplicada para reducir las reacciones de precipitación - la adición de P como fluido a suelos calcáreos evita estas reacciones de precipitación



3  
C

## Incrementando la eficiencia de P – reduciendo la tasa de liberación de P

- En la actualidad no hay evidencia que sugiera que la reducción de la tasa de liberación de P de los gránulos reduce la adsorción de P por el suelo
- Sin embargo, puede producirse una mayor eficiencia de P cuando las pérdidas de P por escorrentía o lixiviación son grandes



Fertilizante  
fosfatado  
soluble

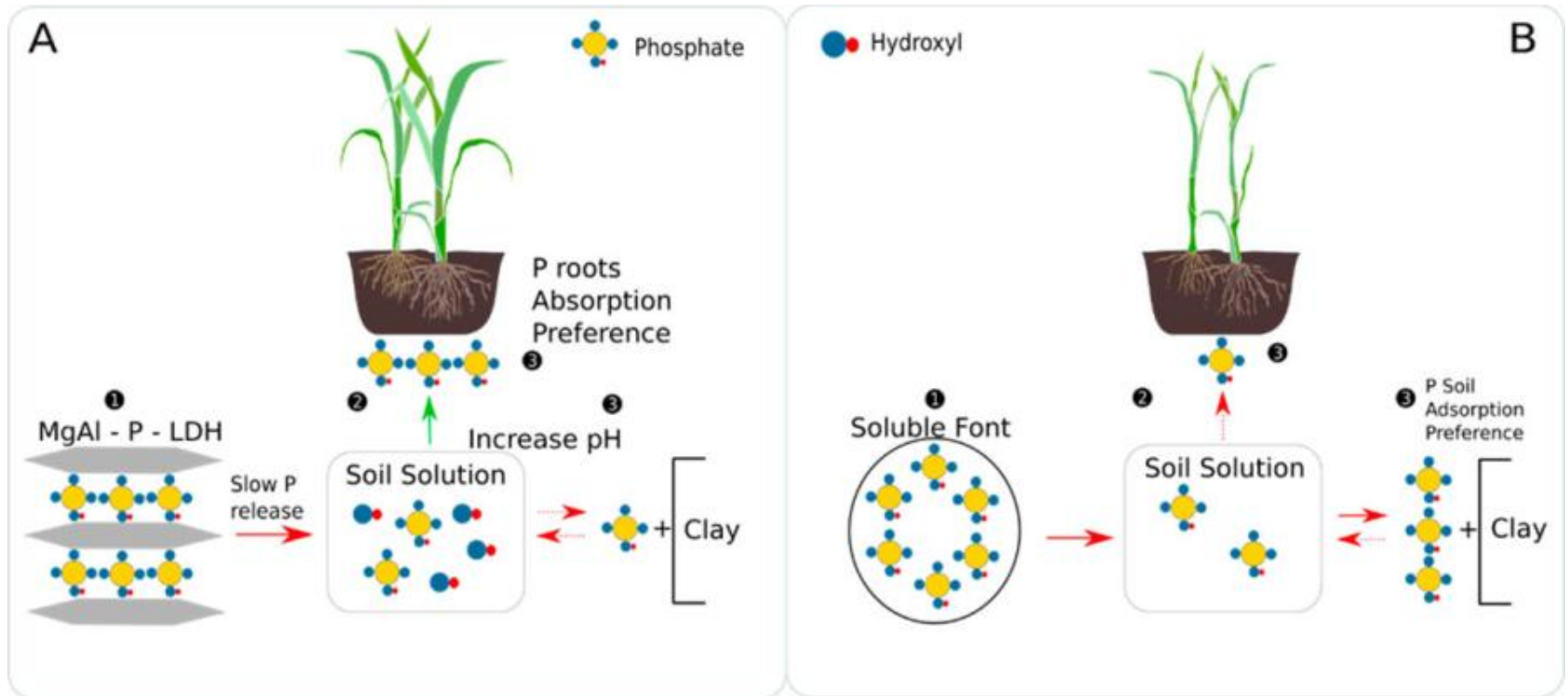
Fertilizante  
fosfatado de  
liberación lenta

## Incrementando la eficiencia de P – nuevas tecnologías posibles

- Compuestos de grafeno-metal - liberación lenta de P
- Estructuras metal-orgánicas - liberación lenta de P
- Hidróxidos dobles en capas (LDH) - forma de liberación lenta de P
- Nanohidroxiapatita - más eficaz?

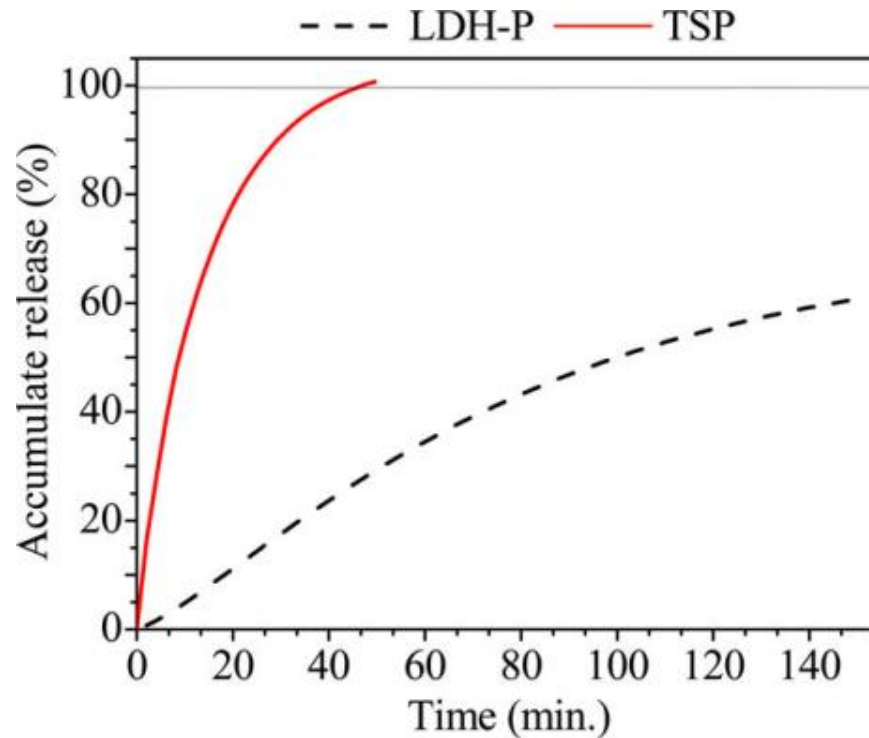
# Incrementando la eficiencia de P – nuevas tecnologías posibles

Hidróxidos dobles en capas (LDH) – pueden proveer una forma de liberación lenta de P



# Incrementando la eficiencia de P – nuevas tecnologías posibles

Hidróxidos dobles en capas (LDH) – pueden proveer una forma de liberación lenta de P



# Incrementando la eficiencia de P – nuevas tecnologías posibles

Nanohidroxiapatita – partículas muy pequeñas (< 100nm) de hidroxiapatita

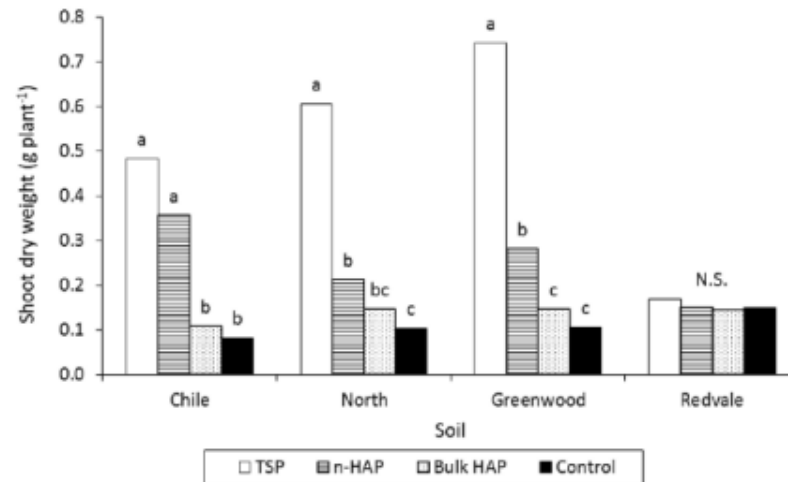
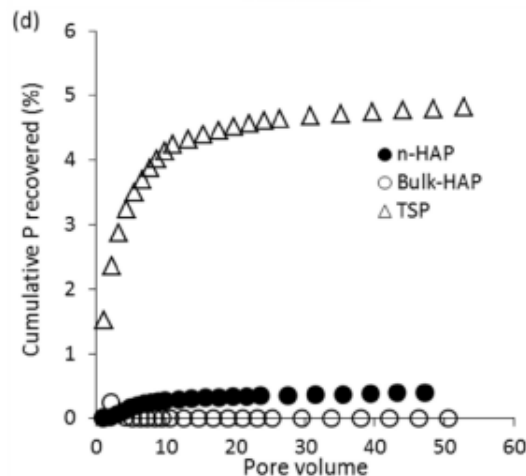
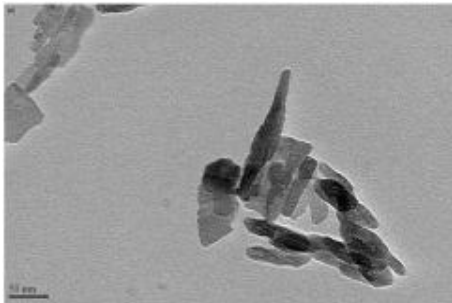
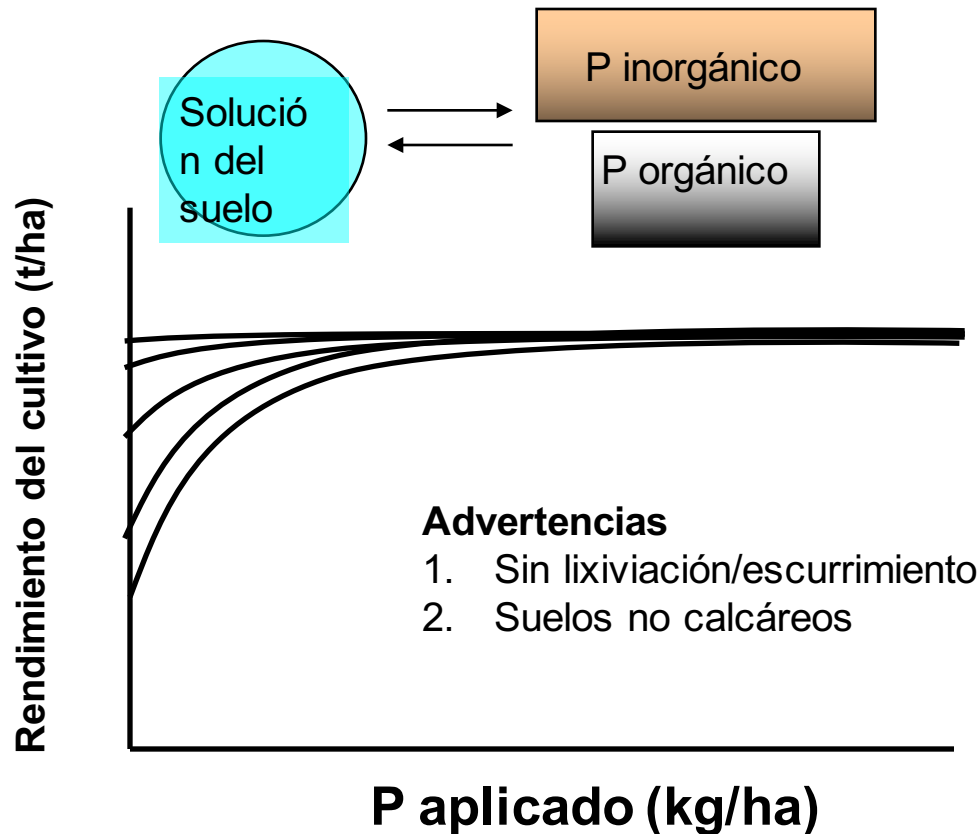


Fig. 3. Shoot dry matter yield (g plant<sup>-1</sup>) for wheat grown in Andisols (Chile and North) and Oxisols (Greenwood and Redvale) with P supplied as TSP, n-HAP and Bulk-HAP. A control treatment (nil P) was included for each soil. Bars appended with different letters are statistically different at  $P \leq 0.05$ . N.S. indicates no significant difference. (Analysis on log-transformed data to homogenize variance.)

3

## Incrementando la eficiencia de P – cuan importante es?



3

## Incrementando la eficiencia de P – cuan importante es?

Plant Soil (2015) 397:401–409  
DOI 10.1007/s11104-015-2514-5

REVIEW ARTICLE

So  
ph  
N.J  
no lo  
any n  
year.

Once a soil has reached the stage in which penetration is  
no longer important, there should be no need to supply  
any nitrogen in the previous  
year.

### Advertencias

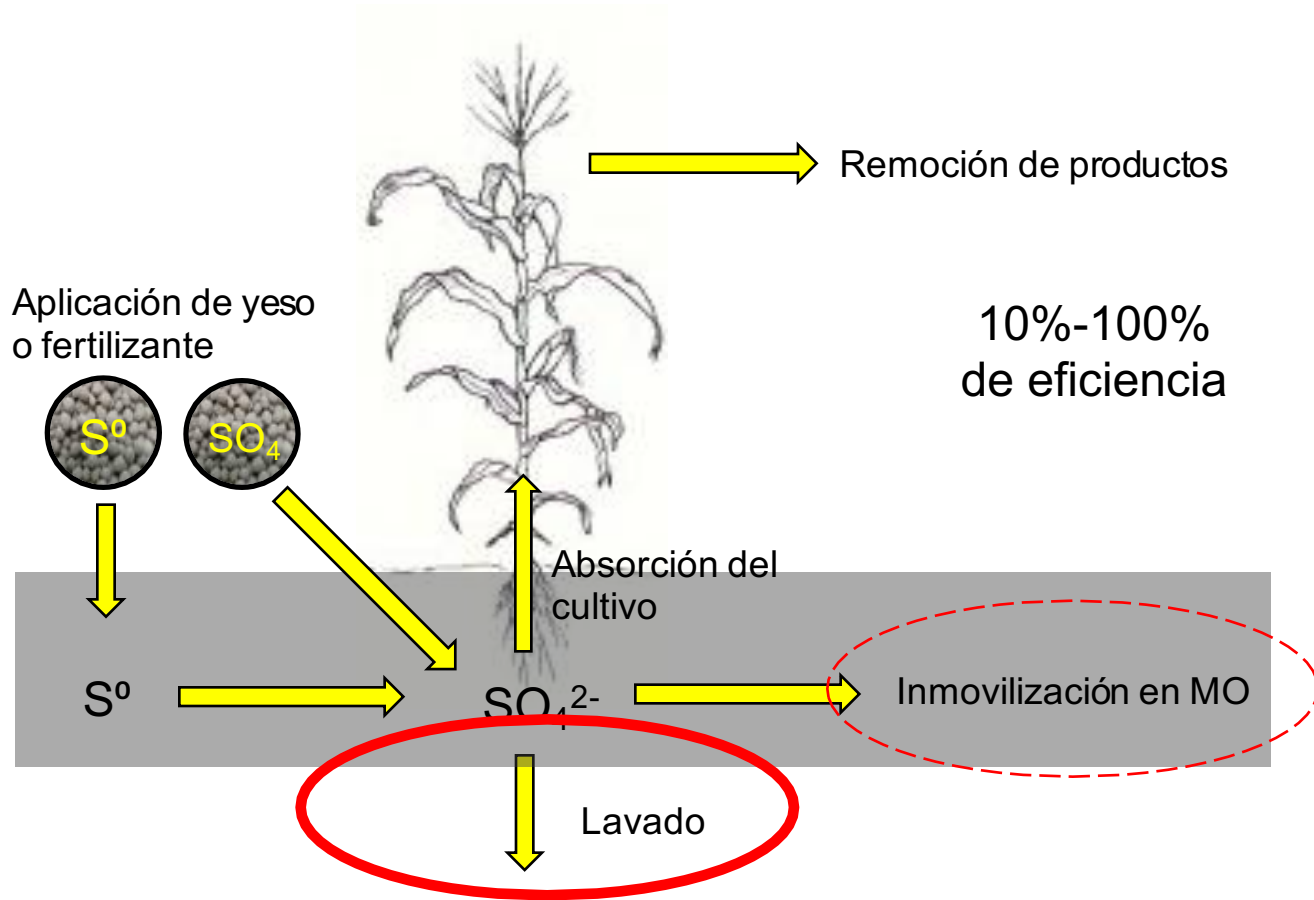
1. Sin lixiviación/escorrimento
2. Suelos calcáreos aun problemáticos

... of phosphate ions into the soil particles.



# Azufre

# Azufre – ineficiencias



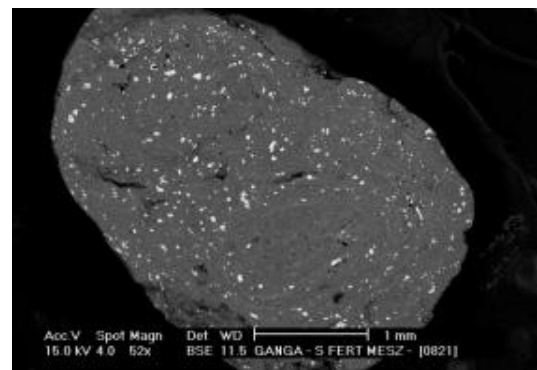
## Liberación lenta/controlada de S

- En ambientes donde la lixiviación de sulfato es problemática, la forma más barata y más fácil de suministrar S de liberación lenta es a través de S ( $S^0$ )
- La oxidación de  $S^0$  es muy lenta como para proveer S a la nutrición del cultivo en etapas tempranas de crecimiento por lo que generalmente se necesita de  $SO_4$  en la formulación
- Muchos productos combinados  $SO_4/S^0$  se han producido a través de los años en base a productos como SPS y SPT
- Son menos comunes las formulaciones de  $SO_4/S^0$  con MAP/DAP – aunque ahora son más populares

## S<sup>0</sup>/SO<sub>4</sub>-fosfatos de amonio mejorados

p.e. MicroEssentials™ Thiogro™

- Mezcla de sulfatos y S elemental and elemental S en todo el gránulo con MAP/DAP
- Incrementar el contenido de S sin comprometer el contenido de P
- Provee N, P, tanto de liberación rápida como liberación lenta



# Zinc

## Elementos traza - zinc

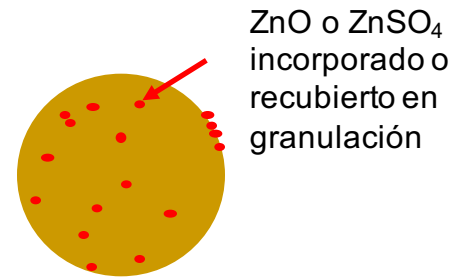
- El Zn reacciona fuertemente con los componentes del suelo, especialmente en suelos alcalinos/calcareos. Tal deficiencia de Zn puede ser severa en estos casos
- Alta materia orgánica o alto contenido de óxidos de Fe/Al puede dar lugar a baja disponibilidad de Zn
- Los requerimientos de Zn podrían suministrarse con fertilizantes N/P para lograr una buena distribución en el suelo
- Muchos fertilizantes NP están enriquecidos con  $\text{ZnSO}_4$  o  $\text{ZnO}$

## Elementos traza - zinc

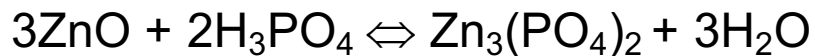
- Incompatibilidad de cationes traza (Cu, Mn, Zn) incorporado con fosfatos – reduce la solubilidad



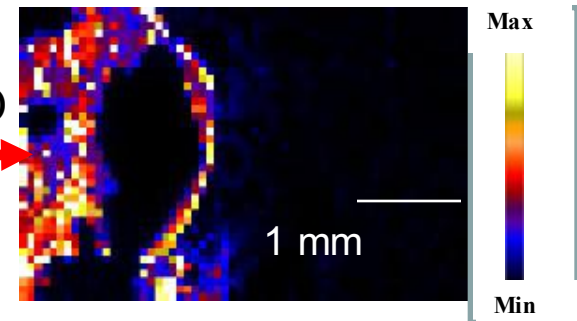
+ otros precipitados de fosfatos



- Los recubrimientos de elementos traza NO escapan a esta química



Eficiencia del fertilizante < 1%



# Solubilidad de Zn en agua en gránulo es un predictor clave de la performance





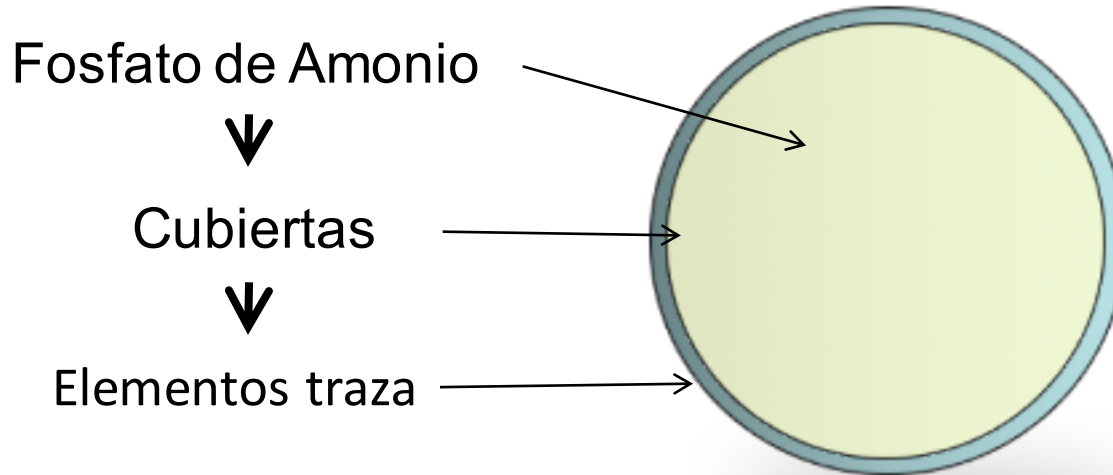
# Incremento de la eficiencia de Zn – Tratamiento post-granulación

- Spray simple post granulación para incrementar el Zn soluble en agua



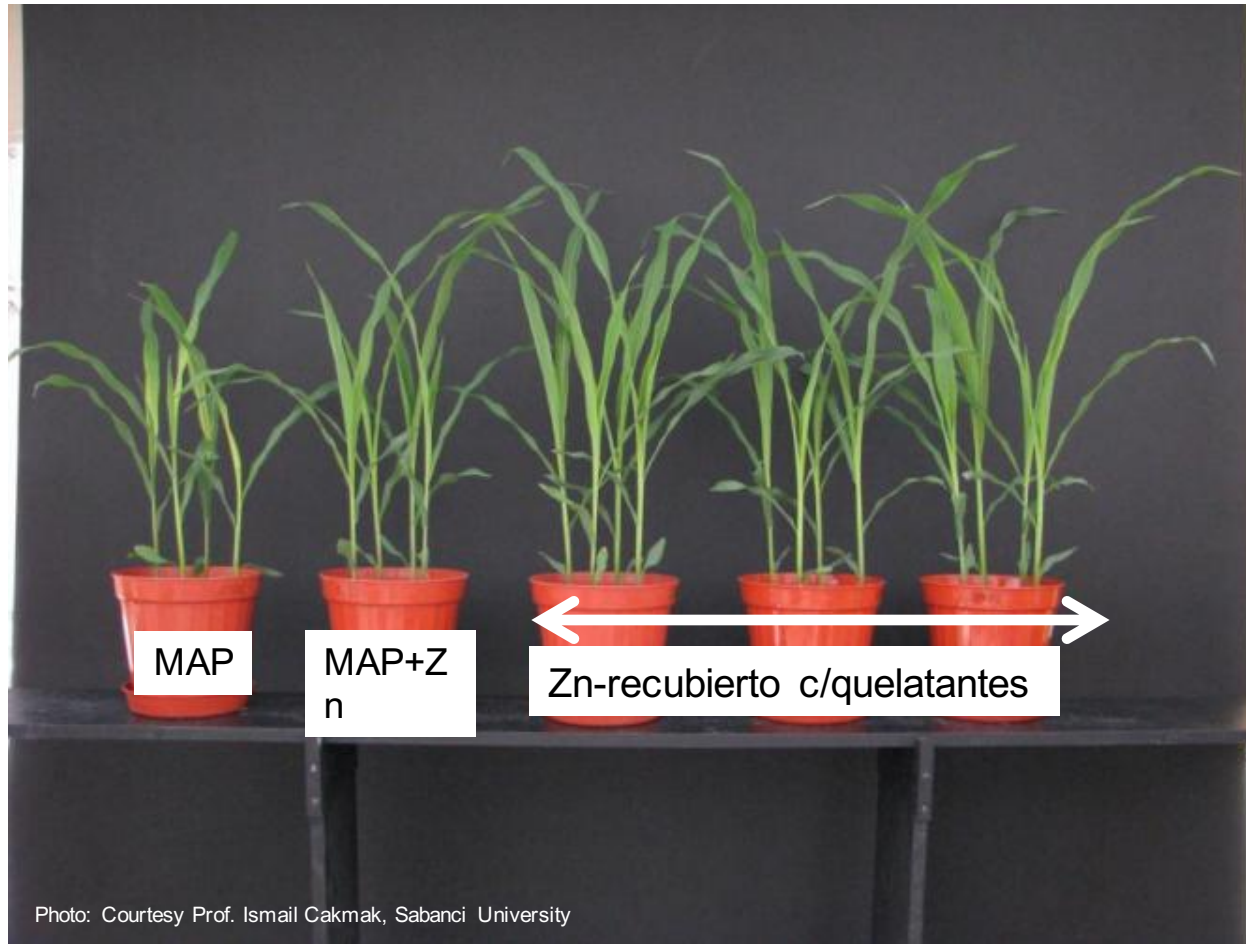
# Fertilizantes de Zn mejorados

Barreras físicas para reducir la precipitación de fosfatos de Zn e incrementar la solubilidad en agua



Peacock A, Stacey SP and McLaughlin MJ. 2010. United States Patent and Trademark Office Application No 61/309,894. Fertilizer Composition Containing Micronutrients and Methods of Making Same.

# Fertilizantes de Zn mejorados



# Resumen

- Para N, S y elementos traza hay oportunidades para mejorar la eficiencia para el 2025 a través de formulaciones novedosas
- Las oportunidades para mejorar (y la necesidad generalizada de mejorar) la eficiencia de los fertilizantes fosforados no son fuertes (a excepción de los suelos de bajos en P con alto poder de sorción)
- Las ganancias son más probables de lograrse mejorando el conocimiento fundamental de las reacciones que ocurren durante la formulación del fertilizante, su disolución, interacción con el suelo, y el transporte a través de la membrana de la raíz o de la superficie foliar
- Los nuevos materiales ofrecen oportunidades para desarrollar productos a medida. El precio y la disponibilidad de estos nuevos materiales será el obstáculo a superar
- **¡Cuidado** con las afirmaciones falsas sobre la **efectividad** y el **diseño de experimentos** robustos para probar los **mecanismos subyacentes** y tener una **evaluación a campo** en varios sitios!

# Agradecimientos



Australian Government  
Australian Research Council



Grains  
Research &  
Development  
Corporation



[www.adelaide.edu.au/fertiliser/](http://www.adelaide.edu.au/fertiliser/)

The screenshot shows the homepage of the Fertiliser Technology Research Centre (FTRC) at the University of Adelaide. The header features the text "Fertiliser Technology Research Centre" and the University of Adelaide logo. A navigation menu on the left lists: FTRC Home, About the FTRC, Research, People, Partners, Publications, News, Events, and Contact. The main content area includes a "People" image with a "Find out more" button, a "Welcome to the Fertiliser Technology Research Centre" section with a descriptive paragraph, a "Quicklinks" section with links to Soil Science - AFW, School of Agriculture, Food & Wine (AFW), and The Waite Research Institute (WRI), and a "News" section with a "New Agreement for Advanced Fertiliser Research" article.

**Fertiliser Technology Research Centre**

THE UNIVERSITY of ADELAIDE

*FTRC Home*

**FTRC Home**

About the FTRC

Research

People

Partners

Publications

News

Events

Contact

**People**

Find out more >

**Welcome to the Fertiliser Technology Research Centre**

The Fertiliser Technology Research Centre (FTRC) is a University of Adelaide Research Centre located within the School of Agriculture, Food and Wine. The FTRC focuses on the understanding of fundamental processes controlling fertiliser efficiency in a wide range of soils globally, using a combination of spectroscopic, speciation and radio-isotopic techniques. The Centre manages and conducts experimental work under laboratory, glasshouse and field conditions to develop more effective fertiliser formulations to optimise their efficiency.

**Quicklinks**

- > Soil Science - AFW
- > School of Agriculture, Food & Wine (AFW)
- > The Waite Research Institute (WRI)

**News**

**New Agreement for Advanced Fertiliser Research**

A new five-year, \$8.5 million partnership agreement between the University of Adelaide and US-based fertiliser producer The Mosaic Company.