

**LIGA AGRICOLA INDUSTRIAL DE LA CAÑA DE AZÚCAR
DIRECCIÓN DE INVESTIGACIÓN Y EXTENSIÓN DE LA
CAÑA DE AZÚCAR –DIECA-**



**EL NITROGENO, FÓSFORO Y POTASIO
EN LA CAÑA DE AZÚCAR**

**MARCO CHAVES SOLERA
DIRECTOR DIECA**

**SETIEMBRE, 1999
SAN JOSE, COSTA RICA**

NITRÓGENO (N)¹

INTRODUCCIÓN

De los elementos que la caña de azúcar obtiene del suelo para satisfacer sus necesidades nutricionales normales, probablemente el nitrógeno (N) es el nutrimento esencial que más limita su desarrollo, determina el comportamiento productivo de la planta y con ello los rendimientos agroindustriales del cultivo (**QUINTERO, 1997; WOOD, 1992; ANDERSON, 1997ac**).

La condición de cultivo extensivo propia de la caña de azúcar, aunada a su gran capacidad extractora y productora de materia seca, hacen que los requerimientos nutricionales del N sean en este caso particularmente elevados (**CHAVES, 1986a; 1999**).

Las necesidades de fertilización del cultivo de la caña dependen de los contenidos disponibles presentes en el suelo, así como de los diversos factores de clima, suelo y manejo que afectan y determinan su aprovechamiento.

El uso del N en el cultivo de la caña de azúcar en Costa Rica es en términos genéricos deficiente, debido a que por lo general se irrespetan en muchos casos principios básicos conducentes a maximizar su eficiencia técnica, minimizar su costo relativo e impacto ambiental y optimizar con ello su beneficio desde la perspectiva técnico-económica. Es por tanto necesario y casi obligante en la coyuntura actual, que el productor emplee con mayor criterio técnico los fertilizantes a través del manejo adecuado del suelo y del cultivo, a efecto de ser más eficiente y competitivo en su gestión empresarial.

Existen muchos argumentos convincentes que pueden esgrimirse para justificar el por qué deben emplearse dosis adecuadas de fertilizantes nitrogenados, y del por qué deben ejecutarse prácticas apropiadas para su aplicación. Está amplia y suficientemente demostrado en la agroindustria azucarera, que el uso eficaz del N redundará en producciones con mayores rendimientos y calidad agroindustrial, con estructuras de costos relativas menores por unidad producida, lo que implica a su vez mayor ganancia para el agricultor (**CENICAÑA, 1995; CHAVES, 1996; QUINTERO y JARAMILLO, 1995**).

Bajo la falsa creencia de que las altas aplicaciones de fertilizantes nitrogenados aseguran rendimientos elevados de azúcar, muchos productores se exceden y adicionan a

¹ Expuesto en el *“XIII Congreso Nacional de Técnicos Azucareros de Costa Rica (ATACORI)”*, celebrado en Guanacaste, en el mes de setiembre (16,17 y 18) de 1999. p: 187-215.

destiempo e indiscriminadamente el elemento, induciendo más bien graves efectos negativos sobre la calidad de los jugos que no contrarrestan muchas veces el aumento que en el tonelaje de caña pudiera lograrse; además de intensificar los posibles problemas de contaminación de aguas y suelos que de ello pueden derivarse.

El presente artículo se publica con el objeto de informar y comentar algunos aspectos técnicos importantes, relativos al empleo del N en el cultivo de la caña de azúcar; para una mayor comprensión se analizan cuatro tópicos básicos:

- El N en el suelo
- El N en la planta
- Respuesta de la caña de azúcar a la adición de nitrógeno
- Efecto sobre la calidad

Se adjunta además al final literatura que permite ampliar el tema a quienes tengan interés particular en tópicos específicos del tema.

A. EL NITRÓGENO EN EL SUELO

Este nutrimento se encuentra presente en el suelo principalmente bajo la forma orgánica (98%) y apenas un 2% en la forma inorgánica representada por iones amonio (NH_4^+), amoníaco (NH_3), nitrato (NO_3^-), óxido nitroso (N_2O), dióxido de nitrógeno (NO_2^-), óxido nítrico (NO) y nitrito (NO_2^-); además de otras formas cristalinas como las tanakitas (fosfatos amonicoferroalumínicos), producto de la transformación de los fertilizantes fosfóricos (MALAVOLTA, 1976; BERTSCH, 1995).

El NH_4^+ y el NO_3^- son las formas químicas más importantes para la nutrición de las plantas, pues el resto corresponde a formas gaseosas que se pierden del sistema a través del proceso de la Denitrificación.

Como se indicó, la mayor parte del N en el suelo se encuentra contenido en combinaciones orgánicas y se abastece a partir de las deposiciones provenientes de restos vegetales y animales susceptibles de descomponerse. Los residuos de plantas, animales y microorganismos en sus diferentes estados de descomposición contienen: proteínas, aminoácidos, aminoazúcares y quitina; compuestos nitrogenados heterocíclicos, tales como purinas y pirimidinas, probablemente en pequeñas cantidades; amonio ligado a la lignina y a las diversas sustancias orgánicas del medio; complejos organominerales, tales como proteína-arcilla, ácido húmico-arcilla, aminoácido-arcilla; ácidos nucleicos; productos de la degradación de proteínas como histidina, arginina, creatinina, colina, ácido cianúrico y lisina en cantidades pequeñas y transitorias, etc.

A.1 Formas Disponibles

El N contenido en formas orgánicas requiere necesariamente ser transformado a formas inorgánicas por medio del proceso de la Mineralización, para poder ser utilizado por las plantas.

Las principales formas de N del suelo disponibles y por tanto susceptibles a ser absorbidas por las plantas son la nítrica (NO_3^-) y la amoniacal (NH_4^+), sobre todo la primera en el caso de la caña de azúcar, pese a lo cual se han identificado otras formas orgánicas que también pueden absorberse.

Resulta difícil distinguir e individualizar las formas absorbidas en el suelo, en razón de que el N-amoniacal cuando se aplica al terreno se transforma en N-nítrico.

Hay que reconocer que el N se encuentra en la naturaleza en un estado de equilibrio dinámico entre formas libres y fijadas, que establecen todo un sistema integral suelo-atmósfera-planta-animal, donde el paso y transformación de una forma a otra puede ocurrir por varios procesos que forman el denominado **CICLO DEL NITRÓGENO**; el tema debe por tanto ser analizado como parte de un sistema y no como un proceso individual.

A.2 Contenidos

No siendo el N un constituyente natural de los minerales primarios del suelo, su contenido procede de la atmósfera a través de los siguientes procesos: fijación simbiótica y no simbiótica, precipitaciones atmosféricas, descargas eléctricas y adición por medio de fertilizantes comerciales.

Los suelos vírgenes mantienen contenidos de N razonablemente constantes, dependientes en un alto grado de factores climáticos, de vegetación, de las características físicas, químicas y microbiológicas del suelo, del material parental y de la topografía, entre otros.

Se ha comprobado que cuando un suelo virgen es cultivado, se establece un nuevo orden de condiciones que como norma general, conduce a una pérdida y reducción en los contenidos de N; dicha disminución es más intensa en los primeros años y continúa sistemáticamente hasta que se establece un nuevo equilibrio entre pérdidas y ganancias (adiciones).

Este hecho es ampliamente reconocido en el caso de la caña de azúcar, en virtud de que como se indicó la planta es altamente extractiva y agotadora de los suelos donde se cultiva, tal como lo comprobó **ALPÍZAR QUESADA (1976)**; lo cual obliga a restituir y acondicionar nutricionalmente los suelos cultivados con caña, pues caso contrario, su fertilidad natural y capacidad productiva se reducen y limitan significativamente.

La literatura mundial informa que los contenidos de N en el suelo son muy variables, determinando en el caso de los suelos pertenecientes a zonas tropicales concentraciones en el rango de 0,02 a 0,4% en la camada arable, siendo estos más altos en suelos de características orgánicas (**BERTSCH, 1995**).

Existen condiciones y elementos del entorno que regulan y determinan en mayor o menor grado, como se indicó, los contenidos de N en el suelo. Por su relación directa con la Materia Orgánica (MO), es común que los contenidos de ambos (MO-N) disminuyan con la profundidad, siendo mayor su presencia en la superficie donde la deposición de MO y la actividad microbial son también mayores.

Se ha encontrado también que suelos de textura arcillosa, retienen en igualdad de condiciones más N que los limosos y arenosos.

Es asimismo común encontrar por razones climáticas mayores contenidos de MO y N en zonas altas que en áreas de menor altitud. Regiones que producen caña en altitudes superiores a los 1.000 msnm, como acontece en Juan Viñas, San Juan Norte, Cervantes, Santa Cruz de Turrialba y otras localidades de la provincia de Cartago; así como la sección más alta de Grecia, Sarchí, Naranjo, San Ramón de Alajuela y Santa Bárbara de Heredia demuestran este hecho, pues es normal que sus valores de MO superen fácilmente el 10% lo cual no acontece por ejemplo en la región de Guanacaste, donde los valores difícilmente superan el 5%, excepto donde predominan condiciones de inundación (Reducción) como ocurre en suelos del orden Vertisol (Sonzocuitles).

Elementos como la temperatura (°C), el nivel de precipitación (mm), oxigenación, textura, acidez del suelo (pH) y actividad microbial influyen significativamente en todo este proceso, y son por lo tanto los que determinan en alto grado los contenidos tanto de MO como de N existentes en el suelo.

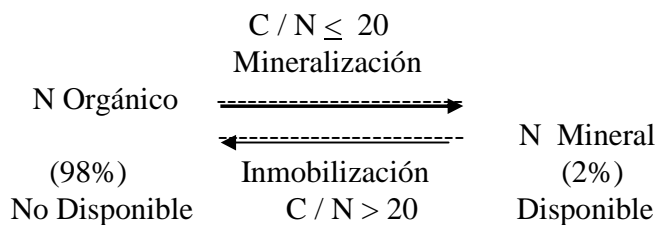
En razón de que las concentraciones de N son altamente variables a través del perfil del suelo en cortos espacios de tiempo, debido básicamente a las variaciones de humedad existentes y la alta solubilidad del nutriente en ese medio, actualmente los laboratorios no realizan análisis rutinarios de nitrógeno en los suelos para fines de recomendación; la falta de correlación entre los contenidos del elemento en el suelo y la producción constituye otro argumento explicativo para adoptar esa medida.

A.3 Transformación y Disponibilidad para las Plantas

Cualquiera que sea la forma de N mineral (disponible) incorporada e introducida en el suelo, ésta tiende a pasar rápidamente a formas orgánicas, sea por absorción de microorganismos (Inmovilización) o por las plantas. El N orgánico a su vez, luego de morir los seres vivos del que forman parte, pasarán nuevamente a formas minerales.

El proceso por medio del cual el N pasa de formas orgánicas para formas inorgánicas (disponibles) es conocido como **MINERALIZACIÓN**. La transformación inversa del N mineral a formas orgánicas (no disponibles) se denomina

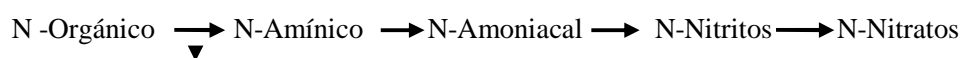
INMOBILIZACIÓN. Ambos procesos están determinados y condicionados por factores que se comentarán más adelante; siendo representados los mismos en la forma siguiente:



A.4 Mineralización de la Materia Orgánica

Con el término Mineralización de la MO se describe como se comentó, un proceso natural de conversión de elementos de una forma orgánica para un estado inorgánico, como resultado de la descomposición microbial (MALAVOLTA, 1976; BERTSCH, 1995). Dicho proceso comprende las transformaciones que ocurren a partir de complejos productos orgánicos en componentes más simples (catabolismo).

Genéricamente las etapas secuenciales que probablemente comprenden la mineralización se indican a continuación:



Las transformaciones bioquímicas propias del proceso son efectuadas predominantemente por microorganismos muy específicos que poseen esa capacidad. Los materiales orgánicos iniciales sirven como fuente de energía y de Carbono (C) para la acción de los organismos heterotróficos (utilizan el C como fuente de energía).

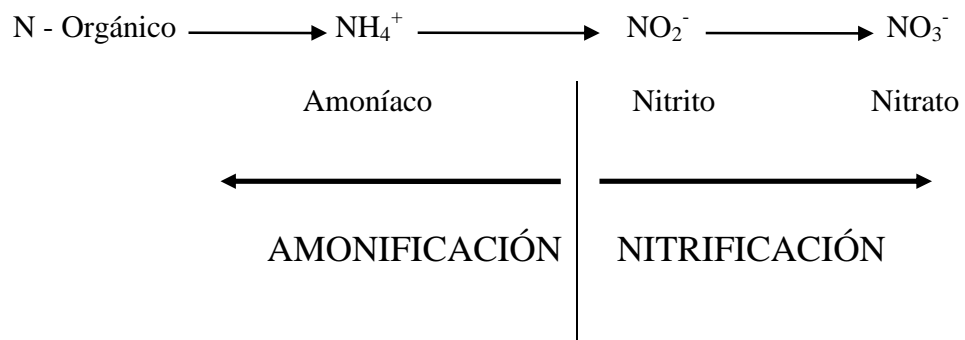
Genéricamente la Mineralización puede resumirse en tres etapas bien definidas que se citan seguidamente:

PROCESO	ORGANISMOS INVOLUCRADOS
AMINACIÓN	Heterotróficos ^{1/}
AMONIFICACIÓN	“
NITRIFICACIÓN	Autotróficos ^{2/}

1/ requieren carbono como fuente energética.

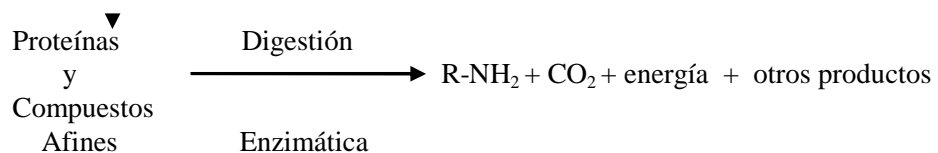
2/ obtienen CO₂ del aire; se nutren a sí mismos.

La conversión del N orgánico en formas minerales disponibles para las plantas se da en dos etapas intervenidas por microorganismos, como se anota a continuación:



A.4.1 Aminación

La MO que se encuentra incorporada en el suelo contiene el N en forma de sustancias complejas y proteínas, las cuales requieren para ser desagregadas y simplificadas, ser atacadas inicialmente por microorganismos heterotróficos que por digestión enzimática (proteolíticas) rompen la estructura de las proteínas liberando el N (depolymerización) en forma amónica (aminas y aminoácidos), como sigue:



Las bacterias y hongos que atacan los materiales orgánicos lo hacen en forma secuencial, de modo que los productos finales generados sirven como fuente de energía a otros. Mucha de la energía generada en esta reacción y las subsiguientes son disipadas en gran parte en forma de calor, razón por la cual los procesos involucrados en la descomposición de la MO son exotérmicos (liberan calor), debiéndose controlar ésta pues de lo contrario puede ocurrir incineración del material vegetal con el peligro de posibles incendios; la fauna microbial se ve también afectada, además de la pérdida del N-NH₃ que se genera en temperaturas elevadas.

A.4.2 Amonificación

Los aminoácidos y aminas liberados por la aminación son atacados y descompuestos también por microorganismos heterotróficos (bacterias, hongos y actinomicetos). Esas reacciones producen N amoniacal a partir de la desaminación y descarboxilación de los aminoácidos, por lo que a esta etapa de transformación del N se le denomina amonificación:



Sólo en condiciones anormales, el amoníaco formado (NH_3) escapará del suelo.

El NH_4^+ formado en el suelo está sujeto a tomar diferentes destinos:

- a) Convertido por Oxidación a NO_2^- y NO_3^- a través de la Nitrificación.
- b) Ser absorbido por las plantas.
- c) Ser utilizado (inmovilizado) por organismos heterotróficos en la fase de descomposición de otros residuos orgánicos.
- d) Ser adsorbido en la superficie de las arcillas (1:1 y 2:1) o fijado por algunos tipos de arcilla (2:1) como complejos organominerales.
- e) Incorporarse en la fracción del humus.
- f) Perderse por lixiviación (lavado).

La fijación del NH_4^+ en las arcillas (2:1) ocurre de forma semejante al K^+ , donde ambos elementos son retenidos entre dos de las capas estructurales de la arcilla. Este fenómeno podría bien estar sucediendo en el país, principalmente en la región cañera de Guanacaste donde suelos dominados por ese tipo de arcillas (Sonzocuitles) son comunes y la presencia de condiciones alternas de secado-humedecimiento favorecen el efecto. Este NH_4^+ fijado puede con el tiempo ser liberado o ir lentamente siendo nitrificado y absorbido por microorganismos y plantas.

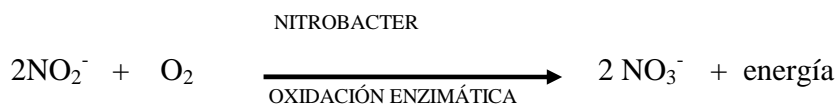
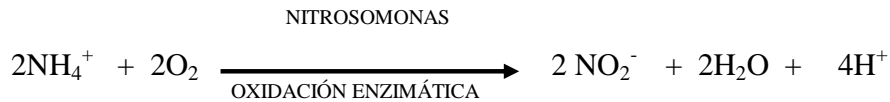
A.4.3 Nitrificación

Corresponde a la etapa de formación de nitratos a partir de sustancias que contienen N reducido. Por medio de este proceso biológico el NH_4^+ mineralizado de las formas orgánicas, así como el NH_4^+ adicionado al suelo a través de los fertilizantes es transformado en NO_3^- por bacterias nitrificantes; en este caso el NH_4^+ sirve también como fuente energética para operar esa acción microbial, ejecutada por organismos autotróficos que obtienen su energía a partir de la oxidación de sales inorgánicas simples y del (C) del CO_2 atmosférico.

La nitrificación es básicamente un proceso de naturaleza oxidativa por lo que necesita buena aireación, temperaturas entre 25 y 35°C, pH ligeramente ácido y condiciones adecuadas de humedad; la existencia de condiciones reductoras inhibe el proceso.

La Nitrificación se realiza en dos fases de ocurrencia simultánea y a velocidades semejantes. En la primera el ion NH_4^+ es convertido en nitrito (NO_2^-), principalmente por las bacterias **NITROSOMONAS**, para que luego ese NO_2^- sea transformado en NO_3^- por bacterias del género **NITROBACTER**; se indica que hongos del género **ASPERGILLUS** son también capaces de efectuar el proceso.

Las reacciones involucradas en este caso son las siguientes:



A partir de esas reacciones pueden inferirse varios aspectos importantes:

- La cantidad de NH_4^+ inicial determina y controla el proceso.
- Es un proceso aeróbico y requiere por tanto de buena aereación (y drenaje) por lo que deben evitarse terrenos encharcados o de pobre percolación.
- Se genera alguna acidez (H^+) que conduce a reducir el pH y con ello la actividad microbial, si fuese muy acentuada ($\text{pH} < 5,5$).

El empleo continuo de fertilizantes nitrogenados que provocan acidificación del suelo requieren cautela, aunque también de ser posible y necesario encalado.

El NO_3^- formado puede a su vez:

- Ser absorbido por las plantas
- Utilizado por los microorganismos
- Perdido por lixiviación al ser muy soluble y móvil en el suelo
- Ser reducido a compuestos volátiles a través de la denitrificación

Se estima que bajo condiciones normales el paso de $\text{NO}_2^- \longrightarrow \text{NO}_3^-$ es muy rápido lo que impide en un alto grado la acumulación de nitritos (NO_2^-) en el suelo, los que resultan tóxicos para las plantas, animales y el hombre mismo. Hay sin embargo algunas evidencias de que el nitrito podría ser retenido en suelos alcalinos ($\text{pH} > 7$).

Se procura actualmente en la agricultura moderna que el proceso de la Nitrificación sea eliminado o al menos retardado, lo que permitiría alcanzar varios beneficios tangibles;

para ello se experimenta el uso de la diciandiamida (DCD) conocida comercialmente como DIDÍN y que corresponde a una forma dimérica y soluble de la cianamida (**BERTSCH, 1995**).

Con el retardamiento o eliminación de la nitrificación se alcanzan efectos como los siguientes:

- Se produce una mayor cantidad de NH_4^+ disponible para las plantas.
- Hay ahorro energético para la planta al no tener que reducir internamente el NO_3^- absorbido del suelo, con el objeto de incorporarlo en sus componentes nitrogenados (aminas).
- El NO_3^- es poco retenido por el suelo y por tanto sujeto a lixiviación y disminución de sus contenidos, conduciendo a deficiencias aunque éste se aplique.
- La Denitrificación se produce a partir del NO_3^- aumentando las pérdidas de N.
- La Nitrificación genera acidez en grados importantes en el suelo, que autoinhibe a su vez la Mineralización.
- Incrementa los contenidos de nitratos en el agua favoreciendo los procesos de EUTROFICACIÓN (agotamiento del oxígeno disponible en el agua por sobrepoblación microbial).
- Se asocian los nitritos con la formación de nitrosaminas de aparente efecto mutagénico y cancerígeno al reaccionar con las aminas.
- Hay ahorro en la cantidad y el número de aplicaciones de fertilizantes nitrogenados, lo que genera a su vez beneficios económicos.

El DCD opera sobre la primera etapa de la nitrificación (oxidación del amonio) provocando un efecto bacteriostático y no bactericida pues no mata la bacteria (nitrosomonas), para la cual es específica; además no deja residuos de efecto negativo en el suelo, pues produce al final NH_4^+ y CO_2 (**BERTSCH, 1995**).

A.5 Pérdidas en el Suelo

Las condiciones climatológicas que caracterizan los trópicos húmedos pueden inducir pérdidas significativas de N, debido fundamentalmente a los altos niveles de precipitación y temperatura propios de la región.

Los procesos más importantes que intervienen en la pérdida de N en el suelo son los siguientes:

- Lixiviación
- Fijación
- Denitrificación
- Inmovilización
- Volatilización
- Erosión
- Remoción por las cosechas
- Quema

A.5.1 Lixiviación

El nitrato posee una alta solubilidad en el agua que induce pérdidas importantes cuando los suelos poseen buen drenaje, el nivel freático es profundo y la cantidad de agua existente (lluvia o riego) es elevada; la presencia de texturas gruesas (arenosas) con baja superficie de retención (baja capacidad de intercambio catiónico y aniónico) también elevan las pérdidas.

Las zonas de alta, frecuente y continua precipitación y los terrenos que no poseen cobertura vegetal, también favorecen las pérdidas de N. Se ha determinado que aunque en pequeñas cantidades, el N-NH_4^+ también está sujeto a las pérdidas por lavado.

La investigación ha determinado que en los suelos de origen volcánico (andisoles) la lixiviación del NO_3^- es menor, lo cual se atribuye a la presencia de minerales de alofana y Materia Orgánica en el sistema coloidal que favorecen su retención. Igual efecto se ha comprobado al asociar cultivos respecto a mantener una plantación como monocultivo, ya que el aprovechamiento del N es en este caso muy superior.

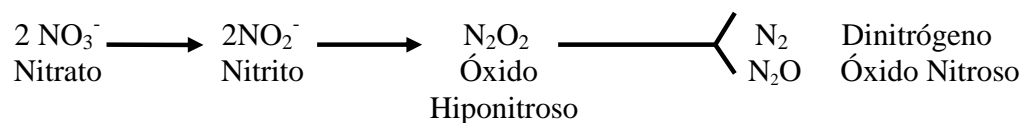
Además de la pérdida de cantidades importantes de N, surge también el peligro de que la deposición, acúmulo y contaminación de fuentes acuíferas pueda provocarse, principalmente cuando se adicionan fuentes fertilizantes que posean nitratos (**CHACÓN y CHACÓN, 1980**).

Surge en este punto la posibilidad de emplear una práctica simple que puede minimizar y hasta eliminar este tipo de pérdidas de N, que es además de efectos favorables en el cultivo de la caña de azúcar, como ocurre con el fraccionamiento del fertilizante adicionado a las plantaciones en el campo.

A.5.2 Denitrificación

Es un tipo de pérdida que ocurre por la existencia de reacciones biológicas que acontecen cuando prevalecen condiciones anaeróbicas en el medio, por ejemplo inundación del suelo y con ello exclusión del oxígeno (O_2). En estas circunstancias algunos organismos facultativos anaerobios (*Pseudomonas*, *Bacillus*, *Micrococcus*, *Paracoccus*, *Achromobacter*, *Thiobacillus denitrificans* y *T. thioparus*) tienen la habilidad de obtener el O_2 que requieren a partir del NO_3^- y del NO_2^- , con la consecuente liberación del N en

forma de N_2 y N_2O , que son gases que se liberan a la atmósfera siguiendo la siguiente reacción:



Sobre el proceso de Denitrificación intervienen varios elementos que lo favorecen, como son: saturación elevada (O_2 limitante) y condiciones de inundación del suelo, pH alto, concentración de nitratos, temperaturas altas, condiciones REDOX y la presencia de (C) orgánico oxidable. Se indica que la Denitrificación es mínima a pH de 4,8 incrementándose sistemáticamente hasta alcanzar su máxima actividad a pH de 8 - 8,6.

Las pérdidas por denitrificación pueden considerarse poco relevantes en términos económicos en suelos bien drenados, aunque pueden como se anotó, alcanzar significancia en terrenos con aireación y drenaje deficiente.

A.5.3 Inmovilización

Corresponde a un proceso de carácter inverso a la Mineralización, por medio del cual los microorganismos del suelo absorben N inorgánico del medio y lo incorporan en su estructura vital, volviéndolo no disponible temporalmente para las plantas.

En apariencia los microorganismos involucrados inmovilizan tanto las formas amoniacales como las nítricas, aunque existe alguna preferencia por las amoniacales.

Tanto la Mineralización como la Inmovilización se presentan en forma simultánea, aunque corresponde a las particularidades propias de cada suelo y su riqueza en N disponible, el establecer predominancia de un proceso sobre otro. La presencia de altos contenidos de fuentes carbónicas (C) de fácil disponibilidad favorecen una mayor Inmovilización.

Se indica asimismo, que relaciones carbono-nitrógeno (C / N) mayores de 30:1 en los residuos orgánicos aplicados al suelo, posiblemente inducen Inmovilización del N, razón por la cual se recomienda la adición de fuentes amoniacales en el caso de residuos desbalanceados a efecto de reducir la Inmovilización y promover la Mineralización. Cualquier favorecimiento de la actividad microbial del suelo (por ejemplo con el encalado), puede inducir Inmovilización del N.

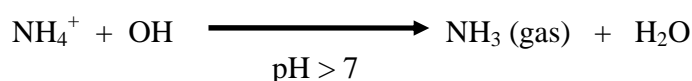
Una vez que los microorganismos mueren, el N Inmovilizado e incorporado en sus estructuras es sujeto al proceso de la Mineralización y liberación al medio.

A.5.4 Volatilización

El N del suelo puede perderse también por Volatilización, al transformarse el N - NH_4^+ en gas amoníaco (NH_3) que parte hacia la atmósfera; igualmente como se indicó, hay pérdidas de N como NO, N_2O y N_2 (PINNA y VALDIVIA, 1978; MALAVOLTA, 1976).

Estas pérdidas son favorecidas por suelos que poseen valores de pH naturalmente altos, o que por el efecto de reacciones temporales esa variable se ve aumentada ($\text{pH} \geq 7,0$), tal como acontece con el encalado.

En condiciones alcalinas el NH_4^+ proveniente de la Mineralización de la MO o de los fertilizantes amoniacales puede ser volatilizado, según la reacción siguiente:



Se demostró por parte de Terman (1979), que el porcentaje de pérdida del NH_3 a partir de la Urea varió del 10% cuando el pH del suelo era de 5,0, a 50% cuando este se elevó a 7,5. Esta pérdida será particularmente acentuada si el fertilizante es aplicado superficialmente en suelos secos y con presencia de temperaturas elevadas.

La pérdida de NH_3 en ese mismo experimento fue del 16% cuando la Urea se aplicó superficialmente, respecto al 6% al localizarse a 3,8 cm de profundidad. En lo referente a temperatura del suelo, la pérdida amoniacal pasó de 6% a 25% cuando la temperatura varió de 7 a 32° C.

El NO_3^- ha mostrado también pérdidas gaseosas en suelos con elevada acidez intercambiable en la forma de ácido nítrico (HNO_3).

El empleo superficial de fertilizantes amoniacales o urea (reacción básica) en suelos alcalinos o neutros que poseen baja capacidad de Intercambio Catiónico (CIC), pertenecientes a regiones cálidas o aplicados en momentos de alta evaporación pueden inducir como se anotó, pérdidas de N en forma gaseosa (PARISH, 1965; PINNA y VALDIVIA, 1978).

A.5.5 Fijación

Ocurre como se anotó con anterioridad principalmente en suelos ricos en arcillas 2:1 (Montmorillonita, Vermiculita, Illita) que poseen amplia superficie interna. Dichas arcillas son constituyentes naturales de muchos de nuestros suelos agrícolas, como acontece con los órdenes Alfisol y Vertisol, ampliamente difundidos en la región cañera de Guanacaste.

El régimen de humedad del suelo que más favorece la fijación de NH_4^+ es el ÚSTICO (permanece 90 días acumulativos seco y 180-90 días consecutivos húmedo sin llegar nunca por lo general a saturarse), pues facilita la expansión y contracción de las

arcillas y con ello la fijación del nutrimento entre las capas interlaminares (**BERTSCH, 1995**).

Esta fijación es mayor cuando se aplican fuertes dosis de fertilizantes de naturaleza amoniacal, siendo su efecto temporal y por tanto pasajero.

A.5.6 Erosión

Algunos autores indican que las pérdidas de N ocasionadas por efecto de la erosión del suelo son elevadas, inclusive superiores a las inducidas por la remoción de las cosechas; lo cierto es que no son despreciables, pues como se indicó los mayores contenidos de ese nutrimento se encuentran casualmente en las capas superficiales del suelo susceptibles a la erosión.

Las pérdidas de N estarán en función de factores como: pendiente y permeabilidad del terreno, precipitación pluviométrica, concentración de N, cobertura vegetal existente y prácticas de conservación de suelos empleadas, entre otras.

A.5.7 Remoción por las Cosechas

La cantidad de N removida por las cosechas es muy variable, pues depende en el caso particular de la caña de azúcar de la variedad cultivada, la edad de cosecha aplicada, el rendimiento de materia prima (TM/ha) alcanzado, la composición química propia de la planta, la humedad y concentración de N asimilable existente en el suelo, la capacidad de despaje del clon, ejecución o no de la práctica de quemar la planta o los rastrojos durante la cosecha, entre otros.

En la caña de azúcar el potasio (K) constituye como promedio mundial (**CHAVES, 1986a; CHAVES, 1996; CATANI et al, 1959**), el macronutrimento esencial que más contiene y posiblemente extrae la planta seguido por el nitrógeno, el silicio, el calcio, azufre, fósforo y magnesio, como se anota en el modelo siguiente de extracción:



Algunos investigadores producto de sus estudios colocan alternativamente al N como el nutrimento mayoritariamente extraído, como se evidencia en los siguientes modelos:



Como promedio y producto del resultado de 54 estudios realizados en el mundo, se tiene que para producir una tonelada de caña la planta extrae del suelo el equivalente aproximado

a 0,93 kilogramos de N, con un intervalo (amplitud) entre valores máximo y mínimo de 2,24 a 0,44 kg/TM de tallos, lo que evidencia el alto volumen de remoción que una plantación comercial efectúa durante su vida comercial. Si estimamos una productividad promedio de caña de 90 TM/ha durante 6 cosechas, la cantidad extraída en ese período será por lo tanto de 502 Kg/ha, a lo cual deben sumarse las pérdidas que naturalmente ocurren por los mecanismos ya descritos.

A.5.8 Quema

La quema es una práctica ecológicamente indeseable pero necesaria en el esquema de manejo actual de plantaciones comerciales de caña de azúcar, que induce pérdidas importantes de N y Azufre (S) por Volatilización, producto de la incineración del material orgánico. Las pérdidas ocurren tanto sobre las plantaciones que se queman en pie como sobre la hojarazca residual (mulch) que permanece en el campo luego de efectuada la cosecha.

A diferencia de otros nutrientes el N y el S no son depositados y reciclados al sistema en forma de sales, sino que se gasifican y volatilizan a la atmósfera. Esta situación obliga a revisar y de ser necesario incrementar las dosis de N, en aquellas plantaciones donde se practica la quema durante la cosecha ya que es de esperar un mayor desequilibrio hacia el elemento.

A.6 Relación Carbono / Nitrógeno (C/N)

Esta relación es muy importante para comprender y cuantificar la dinámica que mantiene un material orgánico en su proceso de descomposición en el suelo. Consiste en la relación cuantitativa que se establece entre el peso del carbono orgánico y el peso del nitrógeno total determinado en un suelo, o también en un material orgánico. La relación es obtenida a partir de la división del porcentaje de carbono orgánico (C) respecto al porcentaje de nitrógeno total (N) existentes en la muestra.

Esta relación es muy variable pues depende entre otros factores de las especies valoradas y la edad de las mismas; normalmente entre más viejo un material (gramínea por ejemplo) menor es el contenido de proteínas y minerales y mayor el de lignina, lo que eleva la relación C / N a valores > 30:1.

Tal como ya se indicó, la velocidad con que ocurre el proceso de la Mineralización depende de factores tales como el tipo de materia orgánica y las condiciones ambientales involucradas, que condicionan a su vez la actividad de los organismos descomponedores.

En el caso supuesto de que un material por descomponer posea una baja concentración de N en relación a la de C (alta relación C/N), entonces los microorganismos que intervienen utilizarán el N presente (NH_4^+ , NO_3^-) en el suelo para promover la descomposición del referido material; se dice en este caso que hubo **Inmovilización** del N en la masa microbiana. En el caso alternativo de que el material vegetal posea un elevado

contenido de N respecto al C (baja relación C/N), la descomposición del material será rápida y equivalente al N presente, liberando y poniendo disponible al suelo una buena cantidad de N (MALAVOLTA, 1976; BERTSCH, 1995; OLIVEIRA *et al*, 1987).

En términos generales puede asegurarse que al adicionar al suelo material orgánico con una relación C/N > 30:1 ocurrirá Inmovilización del N del suelo en la fase inicial de la descomposición. Si la relación está entre 20 y 30:1 no habrá Inmovilización o liberación de N; en caso de que la relación fuera inferior a 20:1 entonces existirá liberación de N al medio en el inicio del proceso.

En los Cuadros 1 y 2 se expone alguna información importante sobre valores C/N pertenecientes a varios materiales orgánicos comúnmente empleados como fertilizantes orgánicos, lo que evidencia su potencial para ese fin.

Cuando se aplican al suelo residuos orgánicos que poseen relaciones C/N superiores al Valor Crítico (20:1) como acontece con la paja de arroz, trigo, maíz, cebada, etc., las plantas fertilizadas pueden presentar deficiencias temporales de N, siendo entonces necesario adicionarlo por medio de los fertilizantes químicos. En el caso de materiales con relaciones bajas como las leguminosas, esta situación y necesidad no acontece.

Como se observa en el Cuadro 1, residuos celulósicos de la caña de azúcar como el bagazo, el bagacillo y también la vinaza (residuos de la destilación alcohólica) poseen una relación C/N muy elevada que varía de 22 a 150:1 lo que induce Inmovilización del N y por tanto deficiencia del mismo, obligando a su necesaria adición por medio de la fertilización química. Lo contrario acontece con la torta residual (cachaza) que se libera en el proceso de fabricación del azúcar, pues su relación C/N es de 7 a 20:1, lo que demuestra su elevado potencial para ser empleado como material fertilizante (MARRIEL *et al*, 1987).

B. EL NITRÓGENO EN LA PLANTA

Se le califica como el cuarto elemento nutricional en importancia para las plantas, luego del oxígeno (O₂), el hidrógeno (H) y el carbono (C).

B.1 Funciones

Entre las principales funciones que cumple el N en la planta de caña de azúcar se destacan las siguientes:

- Es determinante en el metabolismo general de los compuestos orgánicos de la planta.
- Forma parte de numerosos compuestos como aminoácidos y proteínas, amins, amidas, aminoazúcares, nucleótidos, purinas y pirimidinas, alcaloides, coenzimas, vitaminas y pigmentos.

- Es un componente importante de la molécula de clorofila.
- Forma parte de la estructura molecular de los ácidos nucleicos (ADN y ARN) y también de los citocromos.
- Al formar parte de gran cantidad y calidad de compuestos, está implicado directamente en muchos de los procesos de crecimiento y desarrollo de la planta.
- Mantiene una relación sinérgica particularmente especial con el potasio, favoreciendo o limitando su accionar dependiendo de la condición de equilibrio en que se encuentre.
- Aumenta la longitud y el grosor de los tallos por lo que determina los rendimientos agrícolas en forma importante.
- Aplicado tardíamente o en altas cantidades puede afectar negativamente la calidad de los jugos, reduciendo su pureza e incrementando el contenido de azúcares reductores (glucosa y fructuosa), lo que consecuentemente disminuye la concentración de sacarosa en los jugos.

B.2 Contenidos

En materia de concentraciones del elemento en los tejidos de la planta, la literatura (**ORLANDO FILHO, 1983; CLEMENTS, 1980; ANDERSON, 1997 b.**) demuestra la existencia de diferencias muy significativas atribuidas entre otros a los siguientes factores:

- Variedad cultivada.
- Sección de la planta muestreada.
- Edad del tejido analizado.
- Orden de suelo empleado como sustrato.
- Manejo (anterior y actual) aplicado a la plantación, principalmente con respecto a lo referente a nutrición, encalado y quema.
- Condiciones climatológicas prevalecientes en el lugar (agua, temperatura, luz, radiación solar, etc.).
- Condición sanitaria del tejido.
- Presencia de agroquímicos.
- Contenido de humedad en el suelo y en el tejido.

CUADRO 1.
COMPOSICIÓN Y RELACIÓN C / N EN RESIDUOS ORGÁNICOS

PLANTA	SECCIÓN	COMPOSICIÓN (%)		
		M. O	N	C / N
Arroz	paja – cáscara	54,3 - 54,6	0,75 - 0,78	28 - 50
Banano	tallo - hoja – racimo	85,2 - 88,9	0,86 - 3,27	19 - 61
Caña de Azúcar	bagazo – bagacillo	71,4 - 89,9	1,07 - 3,02	22 - 150
	Vinaza	14,6 - 48,6	0,023 - 0,074	14 - 40
Café	cáscara - paja – semillas desnaturalizadas	82,2 - 93,1	0,63 - 1,17	41 - 112
Helecho	Planta	95,90	0,49	67 - 112
Leguminosas	crotalaria - frijol - soya – mucuna	88,4 - 96,7	1,63 - 4,56	11 - 32
Maíz	paja – rastrojos	45,2 - 96,75	0,48 - 0,52	67 - 112
Papaya	cápsulas – cáscara	58,9 - 94,6	0,34 - 1,18	53 - 96
Pasto	jaragua - etc.	86,9 - 93,6	0,86 - 1,17	41 - 81
Trigo	paja – cáscara	85 - 92,4	0,73 - 0,85	56 - 150
Torta	algodón -caña – maní - cacao - papaya – linaza	64,9 - 95,3	2,19 - 7,65	7 - 20
Serrín Madera	-----	93,45	0,06	200 - 865
Yuca	Cáscara	58,94	0,34	96
	hojas – ramas	91,6 - 95,2	1,31 - 4,35	12 - 40

Fuente: **Marriel et al (1987)**.

Autores como **ORLANDO FILHO (1976, 1978, 1983)**, **ANDERSON y BOWEN (1994)**, **HAAG (1965)**, **HUMBERT (1974)**, **MALAVOLTA (1976)**, **CLEMENTS (1980)**, **CENICAÑA (1995)**, **MARTIN et al (1987)**, **THOMAS (1983)**, **SINGH et al (1969)** **ANDERSON (1997b)** presentan resultados de estudios que demuestran la gran variabilidad existente en los contenidos nutricionales del tejido.

CUADRO 2.
COMPOSICIÓN Y RELACIÓN C/N DE RESIDUOS DE NATURALEZA PECUARIA Y HUMANA

RESIDUO	M O (%)	N (%)	C / N
HUMANO	---	1,25 - 6,0	6 - 10
BOVINO	30 – 58	0,3 - 2,9	18 - 32
EQUINO	46 – 58	0,5 - 1,9	9 - 32
AVES	26 – 84	1,8 - 5,9	7 - 16
SUÍNO	53 – 76	1,8 - 6,8	12 - 25
OVINO	65 – 82	0,5 - 1,7	16 - 32

Fuente: **Marriel et al (1987)**

El Cuadro 3 incluye una tabla de contenidos (óptimos y críticos) de N determinados y utilizados como referencia en diversos países de amplia tradición cañera, lo que revela diferencias importantes en las concentraciones allí anotadas.

CUADRO 3.
NIVELES DE CONCENTRACIÓN FOLIAR DE N SEGÚN PAÍS.

PAÍS O ESTADO	NIVEL (%)*		HOJA O TEJIDO USADO	EDAD TEJIDO (meses)	CORRECCIÓN (Kg N/ha)
	Crítico	Óptimo			
Brasil	---	1,65 - 2,59	3	4 - 9	20 - 100
Costa Rica	1,10	1,65	1	3	180
Florida	1,20	2,0 - 2,6	1**	4 - 6	200
Guyana	---	1,9 - 2,5	1	4	100 - 300
Hawai	1,25	1,85	NNI***	3 - 24	385 - 440
Louisiana	1,25	1,50 - 1,75	2	3 - 4	157
Mauricio	1,45 - 1,66	1,66 - 1,75	1	4 - 6	---
		1,74 - 1,94	1	5	---
		1,95	1**	4 - 6	---
Puerto Rico	1	1,50 - 2,00	1	3	100 - 300
Sudáfrica	1,6 - 2,0	2,0 - 2,57	1	3 - 9	200
Texas	1,80 - 2,05	1,9 - 2,2	Hoja/vaina 1-4	4 - 5	---
---	1	1,5 - 2,7	1 - 4	4	---

Fuente: Anderson y Bowen (1994)

* resultados calculados en base a peso seco; los de Hawai se reportan con base a peso seco libre de azúcar

** Sin nervadura central.

*** NNI = índice normal de N, parámetro que utiliza el contenido de N de las hojas 1 a la 4, contenido de humedad de los tejidos, edad del cultivo y se calcula con base a peso seco.

El Cuadro 4 exhibe por su parte, el resultado promedio de la extracción y acumulación de N de la variedad CB 41-76 cultivada en tres suelos de Brasil, demostrando la variabilidad existente en función de la edad de la planta, lo cual se manifiesta y expresa posteriormente en los contenidos foliares (**ORLANDO FILHO *et al*, 1980**).

CUADRO 4.
CANTIDAD DE N EXTRAÍDA (Kg/ha) POR "TALLOS + HOJAS" DE LA
VARIEDAD CB 41-76, EN LOS CICLOS PLANTA Y SOCA EN FUNCIÓN DE LA EDAD
(PROMEDIO DE 3 SUELOS).

CICLO	EDAD EN MESES						
	4	6	8	10	12	14	16
PLANTA	29,70	46,54	73,64	119,55	157,90	166,57	192,98
SOCA	36,39	93,14	123,16	132,10	148,16	--	--

Fuente: **Orlando Filho *et al* (1980)**

Como se anotó anteriormente, la variedad constituye también un factor que induce gran variabilidad en las concentraciones foliares de N, tal como lo demostraron **ORLANDO FILHO y HAAG (1976)** en su estudio, resultados que se presentan a su vez en el Cuadro 5.

CUADRO 5.
CONCENTRACIONES DE N (%) EN LA HOJA + 3,
EN 16 VARIEDADES DE CAÑA PLANTA, BRASIL

VARIEDAD	N (%)	VARIEDAD	N (%)	VARIEDAD	N (%)
CB41-76	2,04	CB56-171	2,28	Co740	2,27
CB45-155	2,03	CB61-80	2,12	Co775	2,11
CB47-355	2,13	IAC50-134	2,24	CP51-22	2,17
CB49-260	2,15	IAC51-205	2,22	NA56-62	2,19
CB53-98	1,96	IAC52-150	2,18		
CB56-156	2,06	IAC52-326	2,17		

Fuente: **Orlando Filho (1983).**

El contenido de **N** es diferente en las distintas secciones de la planta, encontrándose las mayores concentraciones en el meristemo, pudiendo llegar inclusive a duplicar al existente en las hojas en proceso de alargamiento, tal como se demuestra en el Cuadro 6, para esa sección y las hojas +3, 4, 5 y 6 (**MARTIN *et al*, 1987**).

Los Niveles Críticos de **N** en la planta son determinados mediante análisis de tejidos, para lo cual se toma como muestra representativa por lo general (es la más recomendada), la primera hoja que presenta lígula visible mejor conocida como + 1 o **TVD (Top Visible Dewlap)**, aunque existen también otras secciones de la planta sujetas a ser muestreadas. La época recomendada para realizar el análisis corresponde al período de “gran crecimiento” ubicado entre los 5 y 7 meses de edad (**ORLANDO, 1983; CENICAÑA, 1995; SINGH *et al*, 1969; CLEMENTS, 1980; HAAG, 1987; MALAVOLTA, 1976**).

Como se muestra en el Cuadro 3 los Niveles Críticos foliares varían entre 1,00 y 2,05%. La reducción de los contenidos de **N** y humedad conforme la planta de caña se acerca a su período de madurez y cosecha, resulta muy favorable desde el punto de vista comercial, habiéndose establecido la concentración de 0,25% de **N** en la sección de internudo 8-10 del tallo como nivel crítico indicativo de madurez **óptima (CHAVES y SALAZAR, 1989b)**.

B.3 Síntomas de Deficiencia

La insuficiencia de los contenidos de **N** en el vegetal se evidencia a través de síntomas visuales muy característicos. En consideración de exhibir el **N** una elevada movilidad en el interior de la planta, los síntomas de deficiencia se observan primeramente en las hojas más viejas y luego en las más jóvenes; esto debido a que la planta traslada el nutrimento a las secciones que más lo requieren, como ocurre con los puntos de crecimiento activo como son los meristemos, que por lo general poseen concentraciones de **N** muy superiores con respecto a otras secciones de la planta, tal como se demuestra en el Cuadro 6.

Caso que la insuficiencia de **N** sea muy severa, las hojas más viejas mueren debido al incremento que se verifica en los contenidos de ácido abscísico que ocasiona afección a las vainas foliares. Las puntas y márgenes de las hojas pueden a su vez secarse en forma prematura; así como también el crecimiento vegetativo se retarda sustancialmente, volviendo los tallos cortos y delgados (**ANDERSON, 1997b; SUBIRÓS, 1995; ORLANDO, 1983**).

ANDERSON y BOWEN (1994) describen y ubican la deficiencia de **N** predominantemente en hojas viejas que mueren en forma descendente. Señalan la existencia de efectos generalizados en toda la planta, caracterizados por la presencia de hojas de color uniforme, de tono verde claro a amarillo; tallos más cortos y delgados y crecimiento vegetativo más lento. Las puntas y márgenes de las hojas viejas se vuelven necróticas prematuramente. Se ha reportado también (**SUBIRÓS, 1995**) maduración temprana de los tallos que conducen al acúmulo prematuro de azúcares.

CUADRO 6.
VARIACIÓN DEL CONTENIDO DE N CON LA EDAD DEL TEJIDO
EN EL MERISTEMO Y LÁMINAS FOLIARES DE LA
VARIEDAD Ja 60-5 EN CUBA.

EDAD (meses)	CONTENIDO DE N (%)	
	Meristemo	Láminas 3 a 6
Caña Planta		
2,7	4,90	2,36
3,7	4,65	2,08
4,8	4,05	1,98
6,2	3,18	1,77
7,3	2,30	1,67
8,5	2,58	1,53
Primer Retoño		
3,1	4,50	2,35
5,6	4,17	1,97
7,9	2,82	1,76
9,8	2,46	1,56

Fuente: **Martin Oria et al (1987).**

B.4 Absorción y Metabolismo

B.4.1 Absorción

El N emplea como mecanismo principal de movilización en el suelo el **FLUJO DE MASAS**, que consiste en el arrastre de los elementos minerales disueltos en el agua que se mueve hacia la raíz por efecto de la transpiración de la planta.

Como resultado de esa transpiración continua a través de sus hojas, la planta crea una gradiente (déficit) de agua a nivel de raíz que genera una corriente continua (columna) de agua desde diferentes puntos del suelo hacia la raíz, lo que posibilita que cualquier nutriente que se encuentre disuelto en la solución del suelo sea arrastrado por esa corriente hacia el interior de la planta donde es posteriormente absorbido; hay que recordar que un nutriente puede estar en el interior de la planta pero no necesariamente haber sido absorbido, lo cual implica gasto energético (**BERTSCH, 1995**).

Queda por tanto claro que la concentración del elemento en el medio de solución y la cantidad de agua transpirada determina el proceso; las condiciones climáticas son también importantes pues afectan directamente la transpiración.

Como se anotó anteriormente, el N llega a la solución del suelo procedente de varias fuentes como son la mineralización de la materia orgánica, el humus, el N atmosférico (descargas eléctricas y arrastre por lluvias) y el N solubilizado a partir de la aplicación de los fertilizantes químicos y también orgánicos.

La absorción del N se da a partir de la solución del suelo, medio en el cual se generan también los mecanismos de pérdida ya comentados, como son la inmovilización, volatilización, lixiviación, denitrificación, etc.

La caña de azúcar retira el N del suelo como iones amonio (NH_4^+) y nitrato (NO_3^-) en tanto las condiciones del medio lo favorezcan y el nutrimento esté presente en el medio.

Está demostrado que los procesos de absorción, distribución, reducción e incorporación del N en formas orgánicas está influenciada y determinada en un alto grado por factores genéticos.

B.4.1.1 ¿Amonio o Nitrato?

Una de las inquietudes y cuestionamientos que surgen a menudo entre productores e investigadores, lo constituye lo relacionado con el comportamiento, la eficiencia y la efectividad de las fuentes nitrogenadas aplicadas al suelo, lo cual genera alguna incertidumbre en virtud de los intereses particulares de quienes promueven las diversas fuentes comerciales, afirmando la superioridad de algunas de ellas sobre otras (**SUTTON, 1993**).

La confusión tiene sentido, debiéndose afirmar que en términos prácticos no existe ninguna fuente nitrogenada que sea la más idónea para todas las situaciones, pues existen factores que favorecen en ciertas condiciones algunas de ellas. Está demostrado que cada fuente nitrogenada induce diferentes respuestas fisiológicas en la planta.

La literatura es contundentemente mayoritaria al afirmar que en condiciones de campo y suelos con buena aireación, el NO_3^- es la forma de N predominante en la solución y por tanto más intensamente absorbida por las plantas.

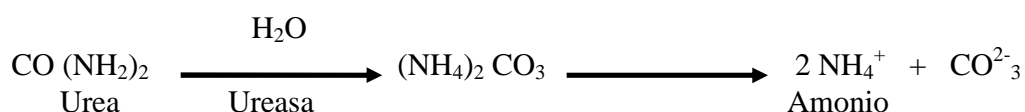
Una vez que el nitrato es absorbido por las raíces puede tomar varias rutas como son, ser reducido en esa sección de la planta por medio de la enzima conocida como **REDUCTASA del NITRATO (NR)**, almacenado en los vacúolos o en su caso ser transportado a la sección aérea, donde podrá ser almacenado o asimilado en formas orgánicas (**SCHRADER, 1984**).

La absorción del NO_3^- en las plantas superiores es muy rápida y sigue los mismos patrones y modelos establecidos para la absorción de iones, requiriendo para ello de energía. En la caña de azúcar se ha demostrado que la concentración de N en la planta disminuye en función de la edad como se comentará más adelante.

El nitrato debe ser reducido antes de ser asimilado, en tanto que el amonio, una vez absorbido, puede ser inmediatamente utilizado en la síntesis de aminoácidos y otros componentes orgánicos.

El amonio aplicado en forma directa, o aquel proveniente del nitrito, nitrato o la Urea es incorporado en aminoácidos a través de una serie de reacciones enzimáticas.

La UREA constituye otra fuente de N de muy amplio uso como fertilizante comercial en la caña de azúcar, que pueden las plantas emplear de varias maneras, siendo la más común la siguiente:



En este caso la Urea es hidrolizada por la ureasa, enzima de muy amplia distribución, en una molécula de CO₂ y dos de amonio; como se nota, el producto final del proceso de transformación de la Urea es N de la forma amoniacal. La Urea puede ser también absorbida en forma directa aunque a una velocidad muy inferior respecto al NO₃⁻ y al NH₄⁺ (MALAVOLTA, 1976, 1981; MALAVOLTA y NEPTUNE, 1983).

Como está demostrado, el NO₃⁻ es la forma nitrogenada que más absorbe la caña de azúcar, aún cuando la fertilización se realiza en forma amoniacal; lo cual es debido a las oxidaciones biológicas que ocurren en el suelo promovidas por la actividad microbiana (OCHOA, 1980; ORLANDO FILHO, 1983; HAAG, 1987; HUMBERT, 1974; MARTIN *et al*, 1987; SILVEIRA, 1985).

La absorción de NO₃⁻ es un proceso netamente activo, lo cual no está aún claro en el caso del NH₄⁺.

Se atribuyen las diferencias observadas en la tasa de absorción de las formas nítrica y amoniacal, como debidas a la acidez del medio. Indican RAO y RAINS (1976), que la absorción de NH₄⁺ se ve favorecida con pH neutros y se reduce al disminuirse este; mientras que en el caso de los NO₃⁻ la absorción es más rápida en pH bajos. Agregan que a valores de pH de 6,8 ambas formas iónicas son absorbidas en forma equivalente.

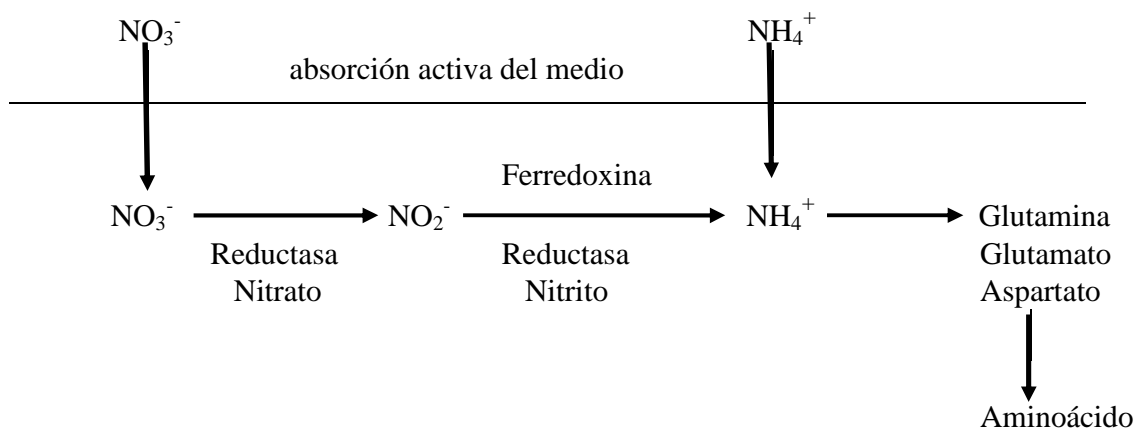
Como práctica racional para evitar establecer alguna predominancia en este sentido, resulta importante que al definir el programa de fertilización que se va a utilizar, se procure emplear una fuente que incorpore ambas formas químicas y establezca un equilibrio en esta materia.

B.4.2 Reducción de los Nitratos

Pese a ser el NO_3^- la mayor fuente de nitrógeno disponible para la caña, éste requiere para poder ser asimilado y metabolizado por la planta, ser reducido primeramente a su forma amoniacal. Como ya se indicó, el NH_4^+ y la Urea pueden ser absorbidos directamente.

Estudios enzimáticos han demostrado que el NO_3^- , que es la forma más oxidada del N, es primeramente reducido a nitrito, y éste a su vez es transformado en NH_4^+ antes de ser incorporado a los constituyentes orgánicos. Las enzimas que catalizan esos procesos son la **REDUCTASA del NITRATO** y la **REDUCTASA del NITRITO**, respectivamente; interviniendo además la sintetasa de glutamina, sintetasa de glutamato y la glutamato deshidrogenasa, además de las transaminasas (VILLALOBOS, 1974; VILLALOBOS y CARVAJAL, 1977).

Se adjunta a continuación la representación esquemática genérica de la asimilación del nitrógeno y su incorporación a los esqueletos carbónicos.



Estudios efectuados con plantas jóvenes de caña de azúcar expuestas a la presencia de NO_3^- y NH_4^+ , en solución nutritiva, mostraron actividad de la Reductasa del Nitrato en las hojas, la cual resultó prácticamente invariable en un período de 10 horas en las plantas mantenidas en medio amoniacal; en el caso de las cultivadas en presencia de NO_3^- la actividad de la enzima aumentó con el tiempo.

Otros estudios han también demostrado que la actividad de la Reductasa en las raíces fue prácticamente despreciable (SILVEIRA y CROCOMO citados por SILVEIRA, 1985).

La reducción de NO_3^- a NO_2^- acontece en el citoplasma de las células, mientras que la de NO_2^- a NH_4^+ tiene lugar en el cloroplasto de los tejidos verdes. Ambas enzimas

operan en serie, razón por la cual la acumulación de NO_2^- (tóxico) durante el proceso es prácticamente despreciable.

Se indica que para las gramíneas con ciclo fotosintético C-4 como la caña de azúcar, el lugar de reducción de los nitratos parece ser preferiblemente las hojas, específicamente en el citoplasma de las células del mesófilo. La actividad de esa enzima en las hojas está inversamente relacionada con la concentración de azúcares.

Varios experimentos han demostrado que en plantas jóvenes de caña de azúcar la actividad de la Reductasa del Nitrato "*in vivo*", es varias veces mayor en las hojas y vainas respecto a las raíces. De igual manera se encontró que en la fase de maduración de la caña, la concentración de nitratos (poseen relación casi directa con la Reductasa) en el tallo es muy baja. Los ápices de raíces también poseen cantidades apreciables de la enzima (SILVEIRA, 1980, 1985; OCHOA, 1980).

La reducción del NO_3^- en la planta puede verse afectada por:

- Deficiencia de molibdeno (Mo)
- Insuficiencia lumínica
- Presencia de temperaturas bajas

Se informa que la adición constante de NH_4^+ en solución nutritiva además de promover un déficit aniónico promueve competición en la absorción de otros nutrimentos como Mg^{2+} , K^+ y principalmente Ca^{2+} .

B.4.3 Translocación

El N que es absorbido por la caña a través de su sistema radicular, es translocado por el Xilema hacia la sección superior del tallo. En el caso del N - NH_4^+ casi todo se asimila en las raíces y se distribuye en forma de aminoácidos, en tanto que el N absorbido como NO_3^- se transloca como tal a las hojas y tallos para ser reducido, aunque en la raíz ocurre alguna reducción.

Por el conducto xilemático el N se transporta como NO_3^- y aminoácidos, mientras que por el Floema son los aminoácidos los que están presentes, no así los NO_3^- que están ausentes.

B.5 Fijación Biológica de Nitrógeno

Al igual que acontece con otras plantas, principalmente leguminosas (frijol común, soya, habas, trébol, guisantes, *Mimosa sp.*, *Stylosantes* y especies arbóreas como *Leucaena spp*), se ha demostrado recientemente luego de más de 40 años de investigación, que la caña de azúcar posee la propiedad y capacidad de fijar N biológicamente en cantidades apreciables.

Algunas bacterias y ciertos microorganismos poseen la capacidad de reducir a amonio (NH_4^+) el nitrógeno del aire (N_2); en el caso de las leguminosas este papel lo cumple el grupo *Rhizobium*, las cuales infectan las raíces y forman módulos donde ocurre la fijación del N.

En el caso de la caña de azúcar se ha encontrado un número considerable de bacterias especialmente del género *Beijerinckia*, asociadas a las raíces de la caña y otras gramíneas. El sistema fijador de N_2 en la rizósfera de la caña está constituido por bacterias aeróbicas, anaeróbicas y anaeróbicas facultativas.

Bacterias de los géneros *Azotobacter*, *Erwinia sp.*, *Enterobacter sp.*, *Caulobacter*, *Derxia*, *Clostridium*, *Vibrio*, *Bacillus spp.*, *Spirillum spp.*, *Klebsiella spp.*, *Azospirillum spp.* y *Saccharobacter nitrocaptans*, entre otras, han sido asociadas a la fijación de N en la caña de azúcar (GRACIOLLI, 1982; URQUIAGA *et al.*, 1989).

Recientemente (1987) se aisló e identificó la bacteria *Acetobacter diazotrophicus* en los tallos de la caña (BODDEY *et al.*, 1995), mostrando características muy particulares como:

- Capacidad de fijar el N_2 a altas concentraciones de azúcar (10% de sacarosa como óptimo y 30% como máximo).
- Crece en condiciones muy ácidas (pH 2,5) sin afectar su actividad de fijación.
- Fija N_2 en presencia de NO_3^- , siendo muy sensible a los radicales NH_4^+ .
- Se le localiza en toda la planta y aún contenida en los residuos de la caña.
- No se le encuentra en terrenos libres de residuos, ni siquiera tratándose de campos cultivados de caña.
- Aparentemente no infecta malezas y hasta la fecha (1995) se le ha detectado solamente en el pasto elefante (*Pennisetum purpureum*).
- Exhibe alguna dificultad para infectar plantas de caña, penetrando apenas cuando éstas han sufrido daños mecánicos o previamente han sido infectadas por hongos de Micorriza.
- En apariencia se propaga a través del material vegetativo de siembra.

Estudios experimentales realizados durante tres años en 10 variedades de caña (URQUIAGA *et al.*, 1992), utilizando tierra marcada con ^{15}N a la cual no se le aplicó N adicional, se determinó que particularmente la especie *Saccharum spontaneum* (Krakatau) y las variedades comerciales brasileñas CB 45-3 y SP 70-1143 produjeron rendimientos equivalentes a 200 TM de caña/ha/año.

Durante el período de estudio se logró acumular una reserva anual equivalente a más de 200 kg de N/ha, sin ocurrir reducciones en el rendimiento o el contenido total de N. Se concluyó por tanto, que esas variedades (mostraron los niveles más bajos de ^{15}N) obtuvieron entre un 60-80% del N como producto de la fijación bacterial.

Informan **BODDEY** y compañeros (1995), que más recientemente investigadores Belgas han determinado que la bacteria *Pseudomonas rubrisubalbicans*, localizada en las hojas de la caña y causante de una enfermedad importante (estría moteada), se encuentra genéticamente relacionada con la bacteria *Herbaspirillum seropedicae*, la cual fija N_2 .

De acuerdo con la literatura algunas variedades de caña poseen mayor capacidad para fijar N atmosférico respecto a otras, cuyo caso permitiría obtener buenos rendimientos en suelos de baja fertilidad en lo que respecta a sus contenidos de NH_4^+ y NO_3^- .

En lo referente a las cantidades de N que pueden ser fijadas biológicamente por la caña de azúcar, los valores reportados son variables; **RUSCHEL et al** citados por **URQUIAGA et al (1989)**, señalan que cerca del 17% del total de N extraído por la planta se debió a la fijación; **VOSE et al** estimaron por su parte, que más del 30% del N extraído por la caña se derivó también de su fijación.

La investigación desarrollada por **GRACIOLLI (1982)** identificó poblaciones de bacterias fijadoras de N_2 en las raíces, las hojas y también en el interior de los tallos de la caña de azúcar. Determinó que los contenidos bacteriales eran mayores en la sección media del tallo respecto a la basal y apical. Encontró también la *Erwinia herbicola* en la sección media y apical y *Azotobacter vinelandii* solamente en la apical; lo que revela que en un plantío de caña la distribución de bacterias es aleatoria.

De todos esos resultados puede inferirse que la fijación de N por parte de la caña es una realidad, por lo que la práctica de quemar hojas, tallos y rastrojos, tanto en el período de cosecha como antes del plantío es negativa, ya que además de destruir la materia orgánica del suelo, elimina también las bacterias fijadoras contenidas en ese medio.

C. RESPUESTA DE LA CAÑA A LA ADICIÓN DE NITRÓGENO

La experimentación de campo realizada a nivel mundial con el nitrógeno es antigua, amplia y muy diversa, habiéndose encontrado casi en forma generalizada una respuesta positiva a su adición; lo cual como es lógico esperar, también se ha manifestado en Costa Rica (**ACOSTA, 1994; MALAVOLTA; 1976, 1981; BERTSCH, 1995**).

Respecto a la fertilización nitrogenada son varios los factores que intervienen y deben necesariamente valorarse durante su empleo, entre los que están: variedades, tipo de suelos, épocas de aplicación, fuentes, fraccionamiento del fertilizante, interacción con otros nutrientes, productos comerciales disponibles, forma de aplicación y condición de humedad prevaleciente en el suelo, entre otros.

A continuación se presenta una breve revisión de resultados nacionales relevantes en este sentido:

C.1 Tipo de Suelo

En el país se han identificado siete de los nueve órdenes de suelo clasificados según Taxonomía del USDA como cultivados con caña de azúcar (**CHAVES y ALVARADO, 1994**), estimándose su orden de importancia como sigue: Inceptisol, Ultisol, Andisol, Vertisol, Entisol, Mollisol y Alfisol.

La respuesta a la aplicación de N ha sido positiva en prácticamente casi todos los tipos de suelo, en virtud de los altos requerimientos que la planta demanda para satisfacer sus necesidades y la insuficiencia casi generalizada que los suelos costarricenses manifiestan al elemento.

En algunos órdenes de suelo los requerimientos se reducen debido a que son parcialmente satisfechos por la presencia de contenidos de MO relativamente altos y condiciones favorables (también relativas) a su mineralización, lo que sugiere aplicaciones de N en dosis de 80 a 150 kg de N/ha.

Suelos de zonas altas (> 1.000 msnm) pese a disponer de altos contenidos de MO debido a tasas reducidas de mineralización por baja temperatura, requieren de la adición de N en dosis importantes; hay que reconocer en este sentido, que las variedades de origen hawaiano (Sigla H), que predominan en ese estrato así lo imponen.

Algunas investigaciones son reveladoras en este sentido, como lo demuestran en sus estudios **ANGULO *et al* (1996 a)**, **BARRANTES *et al* (1991)**, **CHAVES *et al* (1989ae)**, **CHAVES y ALVARADO (1994)**, **ROBLES (1984)**, **RODRÍGUEZ y CHACÓN (1993)**, **SALAZAR y VARGAS (1996 ab)**, **SUBIRÓS (1989)**, **SUBIRÓS y BERTSCH (1996)**, **VÁSQUEZ (1971)**, **CHAVES y ARREA (1986)**, **MAYORGA y MÉNDEZ (1986)**, **ORLANDO y HAAG (1976)**, **ORLANDO FILHO (1976, 1978)**, **QUIRÓS (1993)**, **SÁNCHEZ (1983)** y **VEGA (1985)**, entre muchos otros.

La interpretación que del Cuadro 10 puede derivarse en lo que respecta a orden de suelo predominante según localidad y respuesta obtenida a la adición de N es contundente.

C.2 Variedad

Se ha observado que las variedades manifiestan profundas diferencias en lo que respecta a las necesidades y respuesta al N, las cuales surgen en razón de sus patrones diferenciales de absorción y conversión en materia verde (TM), lo que se traduce al final en mayores productividades de materia prima (caña) por unidad de área (TM/ha).

Existen clones como Q 96 y también los de origen hawaiano, que son ampliamente reconocidos por sus elevados requerimientos nutricionales. Se estima de acuerdo con la experiencia práctica, que puede llegar a ser más determinante sobre los rendimientos agroindustriales la naturaleza del clon que el mismo tipo de suelo donde se encuentre cultivada la planta.

Los estudios de **QUIRÓS (1993)**, **SALAZAR y VARGAS (1996a)** y **DIECA (1993, 1997)**, demuestran la notable influencia que ejerce el clon en este sentido.

C.3 Fuente Fertilizante

Existen en el país diversas opciones comerciales por medio de las cuales se puede adicionar N al suelo, tal como se expone en el Cuadro 7 en el caso de los fertilizantes sólidos. Cada una de esas fuentes posee características y propiedades muy diversas que las tipifican y que están en función de factores como los siguientes (**MALAVOLTA Y NEPTUNE, 1983; CASTILLO, 1994; PUENTE y PAREDES, 1988**):

- Fuente nitrogenada presente (NH_4^+ , NO_3^- , Urea).
- Nutriente(s) complementario(s) o acompañante(s).
- Proporción relativa de la fuente nitrogenada presente en la formulación.
- Disponibilidad para las plantas medida en términos de tiempo, en cuyo caso la Urea es de absorción muy rápida.

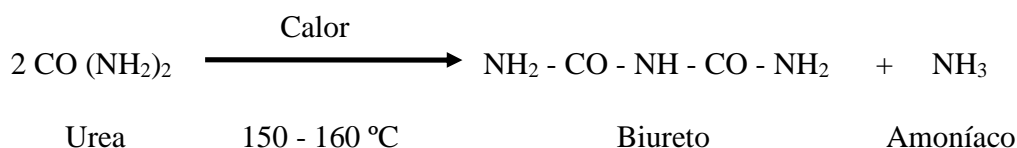
Hay que tomar además muy en cuenta al seleccionar una fuente comercial para ser empleada en la fertilización, la posibilidad de que puedan existir contenidos tóxicos en la misma, como acontece con el **BIURETO** en el caso de la Urea.

**CUADRO 7.
FUENTES NITROGENADAS MÁS UTILIZADAS
EN COSTA RICA.**

FUENTE	FORMA QUIMICA	CONTENIDO (%)					
		N	P ₂ O ₅	Mg O	Ca O	S	B
UREA	NH ₄ - 46%	46					
UREA-AZUFRE	NH ₄ - 40%	40				10 30 (SO ₄)	
NITRATO AMONIO	NO ₃ - 16,75% NH ₄ - 16,75%	33,5					
NUTRASUL	NH ₄ - 17,2% NO ₃ - 9,8%	27				8,3 25 (SO ₄)	
MAGNESAMÓN	NH ₄ - 11% NO ₃ - 11%	22		7 4,3 (Mg)	11 7,8 (Ca)		
SULFATO AMONIO	NH ₄ - 21%	21				23,7 72 (SO ₄)	
NITRABORO	NH ₄ - 10% NO ₃ - 10%	20		8 4,8 (Mg)	11 7,8 (Ca)		0,33 1,06 (B ₂ O ₃)
FOSFATO DIAMÓNICO (DAP)	NH ₄ - 18%	18	46				
NITRATO CALCIO	NO ₃ - 14,4% NH ₄ - 1,1%	15,5			26,5 19 (Ca)		
FOSFATO MONOAMÓNICO (MAP)	NH ₄ - 10%	10	50				

Durante el proceso de fabricación comercial de la Urea es posible que se produzca Biuret o Biureto, sólido residual cristalino e insoluble conocido también como alofanamida. Dicho residuo se forma por calentamiento de la Urea a temperaturas de 150 - 160° C en ciertas fases de la fabricación, como acontece en los granuladores por evaporación; se controla su producción reduciendo la temperatura y el tiempo de resistencia del proceso (MALAVOLTA, 1981).

La reacción que intermedia en su formación es la siguiente:



En países como Costa Rica donde la Urea es utilizada como fertilizante foliar y al suelo, se procura que los contenidos de biureto en la urea comercial sean mínimos pues ésta provoca efectos tóxicos sobre los vegetales, animales y el hombre, sobre todo cuando ésta se aplica al momento de la siembra.

Los límites de garantía admitidos en el contenido de biureto varían de 0,3% en el producto cristalino y 1% en los obtenidos por evaporación y granulados.

En el caso de Brasil la legislación castiga la urea que contiene más del 0,3% para uso foliar y más de 1,5% para empleo en el suelo. En Costa Rica se procura que el contenido de Biureto sea inferior al 1%.

Factores como los siguientes hacen que el N de la urea se pierda con mayor facilidad:

- 1) Suelos con baja capacidad de intercambio;
- 2) Presencia de altas concentraciones de N ureico;
- 3) Altas temperaturas;
- 4) pH elevado;
- 5) Aplicación en superficies húmedas que luego secan.

MALAVOLTA y NEPTUNE (1983) indican que en el término de 5 semanas de incubación entre un 60-70% del N amónico fue convertido en $N-NO_3^-$.

Es importante considerar que existen además de las formas minerales sólidas de N, también las líquidas y las orgánicas.

En el caso de las fuentes líquidas, existen ventajas muy importantes que las perfilan como de amplio uso en un futuro próximo.

Entre las ventajas (**ROBLES, 1994**) que ofrecen los fertilizantes líquidos se tienen:

- Menor costo al interesado por su bajo costo de producción industrial.
- No hay polvo ni gases
- No hay higroscopicidad ni endurecimiento.
- Fácil almacenamiento.
- Fácil manipulación.
- Aplicación por medio del riego y en mezcla con plaguicidas.
- Se puede aplicar foliarmente.
- Mayor eficiencia por ingresar diluïdos al medio.
- Absorción relativamente más rápida.
- Menores pérdidas de N por Volatilización.
- Mayor facilidad de aplicación en el campo.

La fertilización por medios líquidos se inició en Costa Rica en 1980 utilizando el agua monia (NH_4^+), se suspendió y reinició en 1991 (ROBLES, 1994). Señala ese autor que Brasil emplea entre 85-90% del fertilizante líquido en la caña de azúcar lo que revela su gran potencial.

Esta área de la investigación nutricional viene desarrollándose muy rápidamente en el país con resultados muy satisfactorios. SUBIRÓS y BERTSCH (1996) determinaron en Guanacaste, un mejor rendimiento agroindustrial y económico cuando adicionaron N líquido (31-0-0); esta fuente constituida por 11,5% de N-ureico, 9,7% de N-NO_3^- y 9,7% de N-NH_4^+ , fue comparativamente superior respecto al agua amonio (18-0-0) y la Urea granulada como fuentes alternas.

Sobre esta materia existe numerosa literatura que puede ser consultada, como es el caso de BEATON y ESPINOSA (1996), DIECA (1997), CHUI y SAMUELS (1981), MALAVOLTA (1976, 1981), SUBIRÓS (1995), VÁSQUEZ (1971), ROBLES (1994), entre otros.

Complementariamente en un estudio realizado en Juan Viñas a 1.165 msnm con el clon H60-8521 (DIECA, 1997; CHAVES, 1997a) donde se evaluaron siete fuentes nitrogenadas respecto a un testigo sin nitrógeno (Cuadro 8), se encontró luego de 3 cosechas que la urea granulada era la mejor fuente seguida por el sulfato de amonio, al superar al testigo en un 17 y 15%, respectivamente, en producción de azúcar (TM/ha).

CUADRO 8.
EFFECTO DE SIETE FUENTES NITROGENADAS SOBRE
LOS RENDIMIENTOS AGROINDUSTRIALES DE LA
CAÑA EN JUAN VIÑAS.
PROMEDIO DE TRES COSECHAS, CLON H 60-8521

FUENTE	PUREZA (%)	RENDIMIENTO INDUSTRIAL Kg Azúc/TM	TM/ha	
			CAÑA	AZÚCAR
Urea Granular	88,8	130,04	275,8	35,92
Sulfato Amonio	88,8	127,33	277,6	35,33
Magnesamón	89,2	131,09	266,6	34,73
Nitrato Calcio	88,8	131,55	259,4	34,05
Nitrato Amonio	89,7	127,98	265,4	33,98
Urea + Azufre	89,6	130,78	256,8	33,29
Urea + Boro	89,2	136,39	233,4	31,82
Testigo (-N)	89,8	128,64	237,9	30,63
Promedio	89,2	130,47	259.1	33,72

La Urea representa junto con el nitrato de amonio, las fuentes nitrogenadas más ampliamente utilizadas en Costa Rica por el sector cañero.

En Cañas, Guanacaste (9 msnm), se estudió igualmente el efecto inducido por la modalidad de aplicación al suelo: superficial e incorporado, sobre la eficiencia productiva de tres fuentes nitrogenadas: Urea, Sulfato de Amonio y Nitrato de Amonio. Los resultados promedio luego de cosechar la variedad Q 96 en cuatro ocasiones, indican que el Nitrato de Amonio en ambas modalidades seguidas por la Urea fue la mejor fuente; así como la aplicación superficial la práctica más rentable (**ANGULO *et al*, 1996 d**).

Como opción alternativa para adicionar N al suelo se tiene también el empleo de productos de origen orgánico, los cuales han demostrado ser positivos y favorecer los rendimientos agroindustriales cuando aplicados preferentemente complementados con los fertilizantes químicos, no en forma independiente, como lo demuestra el cuadro 9 (**DIECA, 1997; ANGULO *et al* 1999ac.; CHAVES, 1997a**).

Los resultados de esa investigación indican que la fertilización química fue determinante, principalmente sobre la producción de caña; el efecto fue muy favorecido por la presencia de fósforo (P) y el fraccionamiento del fertilizante. La fuente orgánica sola no parece favorecer en definitiva altas productividades agroindustriales en la caña de azúcar. El uso complementario y fraccionado entre ambas fuentes en partes iguales produjo en este caso el mayor tonelaje de caña y azúcar, siendo la fertilización química la más rentable económicamente.

Son varios ya los estudios que han evaluado el beneficio y la opción de utilizar fertilizantes de naturaleza orgánica en la caña de azúcar costarricense, como lo demuestran las investigaciones realizadas por **ALFARO y VILLALOBOS (1996), ANGULO *et al* (1999b), BERROCAL (1988), CHAVES *et al* (1996 ab.), SALAZAR y CHAVES (1996), DIECA (1997), CHAVES (1997a)**, entre otros.

Asimismo, la investigación procura determinar actualmente el valor nutricional que los residuos generados por la agroindustria azucarera poseen, como lo demuestra **CHAVES (1996); CHAVES y GUZMAN (1993ab), DIECA (1997, 1993), CHAVES (1997a), CHAVES *et al* (1996ab)**; se pretende con ello potenciar el valor agregado a esos productos, principalmente la cachaza.

Otra de las posibles opciones de fertilización que surgen en la actualidad, principalmente por ejecutarse satisfactoriamente en otros cultivos, lo representa la fertilización foliar.

Sucede sin embargo que este tipo de modalidad nutricional está poco extendida a nivel mundial en el caso particular de la caña de azúcar; no solamente por las dificultades físicas que su aplicación implica, sino también por los elevados requerimientos de N que la planta de caña demanda para sostener los niveles de productividad pretendidos.

A lo anterior hay que agregar una limitación natural que la planta de caña ofrece a la absorción foliar; se ha comprobado que esta vía de penetración es insuficiente para atender las elevadas necesidades nutricionales de la caña de azúcar.

En realidad existen en esta área pocos estudios en el país, siendo sus resultados aún muy contradictorios y hasta ahora poco consistentes, razón por la cual su empleo práctico es cuestionable, sobre todo en el caso de los elementos mayores (N-P-K-Ca-Mg-S).

**CUADRO 9.
EFECTO DEL FRACCIONAMIENTO DE LA FERTILIZACIÓN
ORGÁNICA / QUÍMICA EN CAÑAS, GUANACASTE, CLON
CP 72-1210. PROMEDIO DE DOS COSECHAS.**

TRATAMIENTOS			RENDIMIENTO INDUSTRIAL Kg /Azúc/TM	TM/ ha	
EPOCA		PUREZA (%)		CAÑA	AZÚCAR
A	B				
Testigo	Absoluto	91,6	122,18	121,5	14,95
Testigo	Orgánico	91,8	123,89	124,7	15,27
Testigo	Químico	89,4	122,82	143,0	17,62
-	O	92,5	124,64	145,2	16,72
-	I	90,6	119,73	131,9	17,85
P	-	92,0	128,13	129,3	16,58
P	O	91,3	125,44	123,4	15,37
P	I	90,0	125,55	124,4	17,37
PO	-	91,3	126,31	127,1	16,11
PI	-	90,8	122,53	100,2	12,31
1/2 O	1/2 O	90,9	118,96	121,9	14,36
1/2 I	1/2 I	90,6	124,60	143,2	17,69
P 1/2 O	1/2 O	91,4	128,54	123,3	17,37
P 1/2 I	1/2 I	91,6	127,59	146,0	17,03
P 1/2 O 1/2 I	1/2 O 1/2 I	91,3	124,58	156,1	19,45
PROMEDIO			124,36	130,8	16,39
CV (%)			6,23	12,76	14,99

ANGULO et al (1999a) Corresponde al promedio de dos cosechas.

Fertilización = Orgánica (O) y Química (I)

Epoca de Aplicación = Siembra (A) y 45 días posteriores (B)

P = Fertilización Fosfórica

Son también muy escasos a nivel internacional los estudios que al respecto se han realizado, habiendo **SINGH et al (1985)** logrado respuesta positiva a la aplicación foliar de Urea.

En el caso de Costa Rica (**DIECA, 1993**) se estudió la adición de fertilizantes foliares (metalosatos) en dos pruebas de campo, una efectuada en Atenas de Alajuela con la variedad CR 61-01 y la otra en San Ramón de Alajuela, con SP 71-3149. Los resultados indican que en el primer caso la respuesta fue positiva, al lograr el producto CROP-UP (400 ml/ha) + Zinc (300 ml/ha), incrementos de hasta un 59% sobre el testigo. Lo contrario sucedió en la localidad de San Ramón con el mismo producto (posee N), pues el testigo resultó superior respecto a todos los tratamientos evaluados.

Se presume algún posible efecto positivo de los fertilizantes foliares (principalmente micronutrientes), cuando adicionados en las etapas iniciales del desarrollo de la planta, la cual es por lo general lenta, sobre todo en el ciclo de planta.

Resulta también factible alcanzar alguna respuesta favorable en condiciones de suelos que manifiesten condiciones de infertilidad extrema, caso contrario es difícil respuestas a las aplicaciones foliares con significancia estadística positiva.

C.4 Epoca de Aplicación

La aplicación del N en forma fraccionada, surge como una de las mejores opciones prácticas que existen para evitar pérdidas significativas de fuentes muy solubles como son los nitratos.

Como cualquier factor productivo, la fertilización tiene índices de eficiencia que determinan su éxito. La literatura señala que en esta materia la eficiencia de utilización de los macronutrientes es: Nitrógeno (50-70%); Fósforo (30-50%) y Potasio (60-80%); lo que significa que en el caso del N sólo entre un 50-70% del total aplicado tiene posibilidad de ser utilizado, el resto (30-50%) se pierde.

Para evaluar efectos se han estudiado recientemente tanto en la localidad de Cañas, Guanacaste (**ANGULO *et al*, 1996c**) como en San Carlos, Alajuela (**SALAZAR y VARGAS, 1996 b**), el fraccionamiento del fertilizante (N-P-K).

Los resultados revelan (**CHAVES, 1997; DIECA, 1997**) que el clon Q 96 respondió mejor en Guanacaste (9 msnm) luego de cuatro cosechas, cuando todo el fertilizante (N-P-K) se aplicó al fondo del surco sin fraccionar. En Cutris de San Carlos (65 msnm), la variedad Pindar cosechada en tres ocasiones demostró que el fraccionamiento del fertilizante era lo más viable técnicamente pero no más rentable económicamente.

A pesar de esos resultados, el fraccionamiento sigue siendo una práctica recomendable y muy racional, puesto que evita pérdidas por escorrentía, lixiviación, fijación y posible contaminación de las aguas por causa del fertilizante; provee además el tiempo conveniente para favorecer una absorción mejor distribuida y equilibrada en el tiempo.

C.5 Forma de Aplicación

Como ya ha sido señalado, es importante para optimizar el beneficio técnico-económico y minimizar las pérdidas de N en el suelo, procurar incorporar el fertilizante de manera que se favorezca su inmediata solubilización y absorción por parte de la planta.

En el caso de fuentes susceptibles a perderse por evaporación como ocurre con la Urea, o por lixiviación con los nitratos, la mejor forma de aplicación del producto es la mecanizada, incorporando y tapando el fertilizante luego de su adición al suelo.

Son numerosos y muy variados los estudios que sobre fertilización existen en el país (CHAVES, 1996), por lo que sería muy amplia la revisión de literatura que sobre este tópico podría desarrollarse; sin embargo por razones de espacio y apenas con el objeto de ubicar al lector, en el Cuadro 10 se expone resumidamente la superficie de respuesta que experimentalmente se ha verificado en nuestros suelos con respecto a la adición de nitrógeno.

CUADRO 10.
ÁMBITO DE RESPUESTA DE LA CAÑA DE AZÚCAR
(Kg /ha) A LA APLICACIÓN DE NITRÓGENO AL
SUELO, SEGÚN REGIÓN DE CULTIVO EN COSTA RICA.

REGIÓN	CANTIDAD (kg N / ha)	
	PLANTA	RETOÑO
GUANACASTE Y PUNTARENAS ^{1/}	80-150	100-150
VALLE CENTRAL	120-180	130-180
TURRIALBA - JUAN VIÑAS	120-180	130-180
SAN CARLOS	110-150	120-150
PÉREZ ZELEDÓN	120-150	120-150
REGIONES ALTAS (> 1.000 msnm)	140-200	140-200
AMPLITUD	80-200	100-200

1/ En suelos del orden Molisol y algunos Vertisoles es recomendable la aplicación de 100-a 150 kg/ha.

D. EFECTO SOBRE LA CALIDAD

El concepto genérico de calidad aplicado a los productos agrícolas es sumamente complejo y viene por lo general referido a dos elementos básicos:

- Calidad externa (visible), y
- Calidad Interna

Esos criterios vienen a su vez determinados por variables más específicas como son:

- Contenido nutricional para la dieta: proteínas, grasas, almidón, vitaminas, etc.
- Materia prima para la transformación: en el caso de la caña esta variable estaría en función del contenido de azúcar en los tallos.
- Para el almacenamiento y el transporte: referido al contenido de agua y azúcar.

En el caso de la caña de azúcar se tiene en la práctica plenamente demostrado que aplicaciones excesivas de **N**, o cuando las mismas son realizadas en forma muy tardía, afectan en muchos casos con carácter significativo la calidad industrial de la caña al deteriorar (disminuir) las concentraciones de sacarosa y con ello las purezas del jugo.

Este efecto se produce por razones de orden metabólico e intermedian en él cuatro elementos principales: a) el contenido de humedad presente en los tejidos de la planta, b) la concentración de nitrógeno, c) el contenido de sacarosa (azúcar no reductor) en los tallos y d) los azúcares reductores (glucosa y fructuosa) presentes en el vegetal.

Es necesario mencionar en este punto que el ciclo vegetativo de la caña de azúcar ha sido descrito (**CLEMENTS, 1980; SUBIRÓS, 1995; CENICAÑA, 1995**) en tres fases básicas (algunos autores indican cuatro):

- FASE 1:** Germinación o retoñamiento (emergencia), ahijamiento, macollamiento y crecimiento; se le ubica su final en el momento que la plantación “cierra” en el campo. Esta fase algunos técnicos las separan.
- FASE 2:** Crecimiento activo alcanzando la planta la plenitud de su desarrollo; finaliza al iniciar la concentración de sacarosa en los tallos con la emergencia de la yema floral.
- FASE 3:** Maduración; con la conversión del meristemo apical en floral se da inicio a esta etapa que finaliza con el punto de máxima concentración de sacarosa y cosecha de la caña. Al igual que el resto de fases está muy influenciada por el clima.

Los efectos que la planta de caña sufre sobre su calidad agroindustrial por las aplicaciones de **N** se dan en estas etapas bajo diferentes formas.

Cuando la planta de caña se encuentra en cumplimiento de sus fases iniciales de crecimiento acelerado (fases 1 y 2), requiere y emplea importantes cantidades de energía para atender sus actividades metabólicas normales de formación de nuevo tejido, para lo cual emplea los azúcares reductores como fuente inmediata de energía; esos azúcares están representados básicamente por la glucosa y la fructuosa (carbohidratos).

En esas fases (sobre todo la primera) la concentración de azúcares no reductores (sacarosa) son bajos, pese a lo cual se incrementan paulatinamente con el tiempo en el tanto la planta de caña se acerca a su última fase de maduración, cuando los contenidos de azúcares reductores a su vez son mínimos (**CLEMENTS, 1980; CENICAÑA, 1995; SUBIRÓS, 1995**).

Como es lógico suponer y de hecho en la realidad sucede, la planta debe disponer además de energía para cumplir con los procesos metabólicos involucrados, también de humedad y nutrimentos.

El nitrógeno en este caso, como ya se comentó suficientemente, cumple un rol vital por las funciones que desempeña, razón por la cual su presencia en esas primeras etapas es significativa y sus concentraciones son por lo tanto elevadas. Resulta por ello normal que conforme la planta de caña de azúcar se acerca a su período de madurez, reduzca y detenga paulatinamente su ritmo de crecimiento y con ello el empleo de los azúcares reductores y el nitrógeno, así como también los contenidos de humedad del tejido; la absorción del nutrimento disminuye (**ZÚÑIGA, 1972; CENICAÑA, 1995**).

La relación entre esos elementos mantiene entonces la siguiente secuencia: en las fases 1 y 2 los contenidos de humedad, N y azúcares reductores son elevados con tendencia a decrecer conforme aumenta la edad, mientras que la sacarosa es baja aunque tiende a incrementarse con el paso del tiempo hasta alcanzar su máxima presencia al final del ciclo vegetativo (fase 3).

Lo anterior explica algunos hechos prácticos importantes como son la necesidad de que la zafra coincida con períodos que induzcan “*estress*” a la planta de caña, de manera que provoquen la detención de su crecimiento con el objeto de favorecer la presencia de azúcares no reductores; esos períodos deben entonces coincidir y presentar reducción de la humedad del suelo por lluvia o riego (Guanacaste y mayoría de zonas cañeras), o en su caso la presencia de temperaturas bajas (Juan Viñas y zonas altas > 1.000 msnm), donde la temperatura nocturna (mínima) llega a 14-16° C provocando el efecto mencionado. Ambos factores (lluvia - temperatura) son de naturaleza diferente aunque inducen el mismo efecto: detener crecimiento y acumular sacarosa.

Si el empleo del N fuera como se indicó, inadecuado en cantidad y época, la planta de caña dispondrá entonces de más energía para promover y mantener el crecimiento en forma acelerada y sostenida, lo que resulta contraproducente para los intereses inmediatos del productor de concentrar más sacarosa, pues lo que en este caso obtendrá será más succulencia de la planta y posiblemente mayor tonelaje de caña (TM/ha). Hay que tener presente que si bien en la agroindustria azucarera este factor (tonelaje) es importante, el

sistema de pago actual se fundamenta en la calidad de la materia prima representada por la acumulación de sacarosa en los tallos. Ocurre también que altas dosis de N inducen volcamiento y favorecen la presencia de plagas y enfermedades por esa mayor succulencia, lo que resulta negativo.

ARIAS (1959) presenta resultados de un estudio donde evaluó los efectos inducidos por la fertilización (N-P-K) sobre la fabricación del dulce, industria en la cual la calidad final del producto elaborado es determinante en su comercialización.

D.1. Concentración de Nitratos

Es conocido que la composición química de una planta está directamente influenciada por las condiciones de cultivo y naturales del sustrato, entre las que interviene el suministro y equilibrio de nutrientes existente.

Algunos investigadores sostienen que muchas de las diferencias observadas en la calidad obedecen y son dependientes de la cantidad de nutrimentos suministrados o existentes en el medio, y no tanto del tipo, sea éste de origen mineral u orgánico.

BERTSCH (1995) señala que en varios estudios se ha verificado la existencia de grandes fluctuaciones estacionales en los contenidos de nitratos en el suelo a lo largo del año, lo que no acontece con el amonio. El patrón seguido en dicho caso es el siguiente:

- a) Durante la estación seca el NO_3^- se acumula lentamente en la superficie arable del suelo, por causa de los movimientos ascendentes del agua por efecto de la transpiración.
- b) Se observa también una concentración mayor de NO_3^- aunque de corta duración al inicio de la estación lluviosa.
- c) Ocurre una rápida disminución durante el resto del período lluvioso.

En estos procesos intervienen varios elementos como son el incremento que ocurre por efecto de la actividad microbial y la mineralización al iniciar las lluvias, con relaciones C/N más bajas.

Señala esa investigadora que con la llegada de la estación lluviosa, los nitratos descienden a través del perfil del suelo a una velocidad que fluctúa entre 0,5 y 5 mm por cada mm de lluvia caída en suelos con alguna textura (gruesa) más o menos arenosa; en los suelos arcillosos la pérdida es más lenta por razones de espacio y tamaño poroso, además de la retención que puede ocurrir por intercambio aniónico.

La aplicación de fertilizantes nitrogenados incrementa la presencia de NH_4^+ y NO_3^- en el suelo, y puede por tanto, al incrementar esas concentraciones en la capa arable del

suelo, colocarlos fuera del alcance de las raíces por efecto de la lixiviación, contaminando con ello las fuentes acuíferas (CHACÓN y CHACÓN, 1980).

En el caso de la caña de azúcar a diferencia de otras plantas hay que reconocer que las características del sistema radicular de la planta son particularmente excepcionales, pues es voluminoso y posee una amplia capacidad de exploración en el suelo, al alcanzar profundidades significativas y extenderse lateralmente en distancias de hasta 10 m. lo que minimiza en mucho las posibilidades de pérdida de los nitratos en el perfil por no absorción.

Es importante dejar claro en este punto, que la presencia de NO_3^- en el suelo puede proceder tanto de los fertilizantes nitrogenados comerciales (industriales) como de la misma mineralización de los materiales orgánicos, razón por la cual la ejecución de prácticas de cultivo que permitan reducir al mínimo la posible fuga de nitratos no debe ser exclusiva de la denominada agricultura convencional.

Al aplicar estiércol al suelo por ejemplo, parte del nitrógeno se encuentra como urea y NH_4^+ solubles en agua, en tanto que otra parte está en formas orgánicas que deben ser mineralizadas; esas fracciones solubles actuarán en este caso en forma semejante a como lo hace un fertilizante mineral.

Se debe tener asimismo presente que la absorción y relaciones iónicas que ocurren en el suelo y la planta, responden fundamentalmente a principios electroquímicos y biológicos, por lo que no existen distingos particulares en cuanto al origen u otras calidades del nutrimento. En la planta o el suelo las formas químicas presentes, sean NH_4^+ o NO_3^- , responden a sus propiedades físico-químicas sin reconocerse si proceden de una fuente orgánica o mineral. Un NO_3^- actúa como tal al igual que el NH_4^+ o cualquier otra forma química del elemento dentro del patrón físico-químico que los caracteriza.

Las diferencias existentes entre las fuentes orgánica y mineral se limita a las cantidades solubles disponibles en un período de tiempo dado, las formas químicas secundarias (o primarias) que se generan en su transformación, el elemento que acompaña y complementa el nutriente principal y la presencia de sustancias con efecto tóxico, como ocurre con el biureto en el caso de la Urea formulada industrialmente.

Los nitratos son ingeridos por todas las personas a través de los alimentos y el agua; así como por el dióxido de nitrógeno (NO_2^-) presente en el aire que ingresa por los pulmones y produce NO_3^- , aunque en cantidades insignificantes.

Todos los alimentos vegetales, principalmente las verduras y hortalizas contienen NO_3^- en sus tejidos, hasta 1 g/kg (70 mg de NO_3^- /día) en el caso de la remolacha roja, espinaca, lechuga, etc. El agua potable puede ser otra fuente importante de NO_3^- ; se acepta por la OMS un límite de 50 mg/l, lo que implica que la absorción puede ser de unos 70 mg de NO_3^- /día. Asimismo, el organismo produce naturalmente entre 30 y 60 mg de NO_3^- /día

como parte del metabolismo normal, todo lo cual es evidencia de que el organismo puede absorber una cantidad importante de NO_3^- que no necesariamente son asimilados (BOCKMAN *et al*, 1993).

El cuerpo humano posee formas por medio de las cuales libera parte del N- NO_3^- adquirido como son:

- El NO_3^- absorbido es excretado por el torrente sanguíneo desde el intestino delgado a través de la orina en el término de 24-48 horas, por lo que no hay acumulación.
- Aproximadamente un 20% del NO_3^- asimilado es excretado por medio de la saliva y reducido parcialmente a nitrito en la boca (se estima en 5 mg de NO_2^- /día).
- Parte del NO_3^- es excretado al estómago como constituyente de los jugos gástricos, donde es reducido a NO_2^- por las bacterias.
- Parte del NO_3^- que logra llegar al intestino grueso es reducido a NO_2^- , ocurriendo también la desnitrificación.

Se indica por parte de organismos responsables de la salud que al ser el nitrito químicamente reactivo, puede reaccionar en el estómago con los componentes alimenticios (Vitamina C) y generar compuestos carcinógenos, lo cual sin embargo es sujeto de discusión.

Los estudios que pretenden demostrar la posible relación existente entre los compuestos nitrosos y el cáncer han sido conflictivos, pues no se ha logrado diferenciar los efectos inducidos sobre el cáncer del estómago por causa de la ingestión de alimentos y bebidas contaminadas, respecto a los alimentos naturales. La situación es compleja sin haber aún evidencia concluyente sobre la implicación del nitrato/nitrito en la génesis del cáncer.

Pese a no existir en apariencia comprobación de la posible existencia de efectos negativos de los nitratos sobre la salud, resulta lógico y necesario adoptar y aplicar con carácter de urgencia medidas tanto de contingencia como preventivas, que conduzcan a minimizar el impacto que los fertilizantes nitrogenados pudieran tener sobre la salud y el ecosistema, sin atentar sobre la eficiencia de los sistemas productivos de alimentos para no desequilibrar los mismos.

Para ello es necesario concientizar y capacitar tanto a técnicos y agricultores sobre la necesidad de optimizar y racionalizar el empleo de los fertilizantes, lo que requiere de una obligada fase de investigación que genere respuestas y opciones viables de solución a los problemas y retos que la satisfacción de las necesidades alimentarias imponen actualmente a la sociedad.

CONCLUSIÓN

El N constituye un elemento de especial y particular relevancia en la nutrición de la caña de azúcar, en virtud de que por su función y funcionalidad en la planta, desempeña un papel determinante en las expectativas técnico-económicas que sobre los rendimientos agroindustriales se establezcan.

Su empleo en forma inadecuada puede conducir a la afección de la calidad de los jugos y con ello al éxito productivo y económico del agricultor. Por el contrario, cuando se adiciona de manera racional y técnica, se convierte en un factor generador de éxito y riqueza.

Es fundamental definir y tener claro, previa aplicación de una fuente nitrogenada, elementos implicados en la misma como son la selección de la fuente a utilizar, la época, forma y equipo a emplear estableciendo las medidas preventivas y de contingencia necesarias que conduzcan a minimizar las pérdidas y los peligros de contaminación, así como los costos relacionados; maximizar también los rendimientos agroindustriales de la caña de azúcar y optimizar en general todos los factores involucrados en un programa de fertilización.

Hay que concientizarse en el hecho de que la fertilización es apenas un factor más, que debe necesariamente complementarse, adecuarse y acondicionarse con el resto de prácticas y actividades que intervienen en el proceso productivo de la caña, nunca creer que él actúa independientemente, lo que obliga a conceptualizar la agroindustria como una actividad integral.

FOSFORO (P)²

INTRODUCCION

Un cultivo como la caña de azúcar para ser competitivo y rentable, requiere necesariamente disponer de todas las condiciones que satisfagan sus necesidades básicas. Es importante en este sentido, conocer y disponer de la tecnología que genere el mayor grado de productividad posible.

Para que esto sea posible, los elementos que intervienen e influyen la expresión del potencial productivo del cultivo, deben integrarse y operarse inteligente y estratégicamente para favorecer un efecto conjunto positivo.

La tecnología aplicada debe considerar y vincular factores de la producción como: variedad cultivada, calidad de la semilla, épocas y técnicas de la siembra, distanciamiento, control de malas hierbas, plagas y enfermedades, irrigación, drenaje, conservación de suelos, cosecha y manejo poscorta, entre muchos otros. Lo relativo a la corrección del suelo y la fertilización del cultivo cobra en este sentido especial relevancia, en virtud de las necesidades de satisfacer los elevados requerimientos nutricionales del cultivo, con miras a la obtención de altas productividades con márgenes de rentabilidad convenientes.

El fósforo (P) desempeña en este sentido un papel determinante, en razón de la importante e insustituible función que mantiene en la fisiología de la planta, haciendo por ello cuestionable cualquier plan serio de fertilización y producción de caña en el cual el mismo no este incluido. Por este motivo se exponen seguidamente algunos asuntos de interés relativos al uso del P en la producción de la caña de azúcar.

El comentario sobre la importancia del P en la caña, se desagregara en varios capítulos que permitirán informar e inferir conclusiones más específicas. Dichos apartados son los siguientes:

- ✓ **EL FÓSFORO EN EL SUELO**
- ✓ **EL FÓSFORO EN LA PLANTA**
- ✓ **RESPUESTA DE LA CAÑA DE AZÚCAR A LA ADICIÓN DE FÓSFORO**
- ✓ **EFFECTO DEL FÓSFORO SOBRE LA CALIDAD**

² Expuesto en el “XIII Congreso Nacional de Técnicos Azúcareros de Costa Rica (ATACORI)”, celebrado en Guanacaste, en el mes de setiembre (16,17 y 18) de 1999. p: 187-215.

A. EL FÓSFORO EN EL SUELO

A.1. Formas

El P se encuentra contenido en el suelo en varias fracciones que muestran diferente disponibilidad para las plantas, las cuales se nombran a continuación:

- ✓ FÓSFORO TOTAL
- ✓ FÓSFORO INORGÁNICO
- ✓ FÓSFORO ORGÁNICO

Igual que acontece con el resto de nutrimentos esenciales la documentación concerniente a este tópico es muy abundante, destacándose la publicada por los siguientes investigadores **ANDERSON (1995)**, **ORLANDO FILHO (1976, 1978, 1983)**, **ORLANDO FILHO *et al* (1980)**, **MALAVOLTA (1976, 1980ab, 1981, 1982a, 1983)**, **BERTSCH (1995)**, **ALPIZAR QUESADA (1976)**, **MARTIN ORIA *et al* (1987)**, **FASSBENDER (1969, 1994)**, **DROSSDOFF *et al* (1975)**, **BAHIA y BRAGA (1975)**, **CENICAÑA (1995)**, **FIXEN (1995, 1996)**, **GARCIA (1973)**, **GOEDERT *et al* (1986ab)**, **IMPOFOS (1988)**, **TISDALE *et al* (1993)**, **ANDERSON Y BOWEN (1994)**, **BESOAIN (1985)**, **RAIJ (1984)** Y **ALVARADO (1984)**.

Por ser químicamente muy reactivo, el P no se encuentra disponible en el suelo en su forma elemental (P), como si ocurre con otros nutrimentos.

La literatura es coincidente en que la principal fuente de fosfatos del suelo es el mineral **APATITA** [$\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{F}, \text{Cl}, \text{OH})_2$], el cual se encuentra presente en casi todas las rocas que dan origen a los suelos: Ígneas, Metamórficas y Sedimentarias.

Los procesos de meteorización del suelo conducen a la descomposición gradual del mineral de apatita y a la formación de fosfatos secundarios. Cuando las reacciones se producen en suelos cuyo medio es ácido, se induce la formación de fosfatos ligados al Fe y el Al por reacciones complejas de intercambio iónico, donde el PO_4^{-3} reemplaza los OH^- de los minerales hidroxilados o el oxígeno de los minerales oxidados, a partir de donde se derivan los iones trivalentes; como nuevos compuestos se forman **VARISCITA Y ESTRENGITA**.

El grado de meteorización química de los suelos se manifiesta en la transformación de fosfatos inorgánicos, lo cual está directamente relacionado con factores tales como: el pH, la actividad que muestren algunos cationes (particularmente Ca, Fe, Mn y Al), los productos de solubilidad de los diferentes fosfatos, las prácticas de fertilización y el encalado, entre otros.

El P nativo también se presenta en el suelo como **CLOROAPATITA** [$\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{Cl}_2$] o en combinación con la fracción arcilla. La mineralización de los fosfatos da origen a la

formación de compuestos muy complejos al combinarse con los iones Ca, Mg, K, Fe, Al y NH_4^+ , así como también con la fracción orgánica del suelo.

A.1.1. Fósforo Total

El **P-Total** se considera que esta presente en contenidos relativamente bajos, manteniendo concentraciones mínimas en la zona templada y muy variables en la zona tropical, lo cual se atribuye a la gran heterogeneidad existente en las rocas parentales (madres), al desarrollo de los suelos, la textura y otras condiciones edafológicas y ecológicas, como lo expresara **FASSBENDER (1969, 1994), RAIJ (1984)**.

Ese mismo investigador determinó que entre más fina fuera la textura del suelo mayor es el contenido de P-Total; el cual disminuye a su vez con la profundidad en razón de la consecuente reducción del contenido (proveedor) de materia orgánica y con ello de los fosfatos orgánicos generados a partir de su mineralización.

Se indica en la literatura que la presencia de factores estabilizantes contenidos en la Materia Orgánica, así como la misma existencia de materiales como la Alofana, inducen el incremento de los contenidos de P-Total en el suelo.

El bajo contenido de P en el suelo se hace crítico en la región tropical, con motivo de la elevada fijación o retención de fosfatos prevalecientes debido a la presencia de materiales amorfos como la Alofana, lo que provoca que no siempre que se aplican fertilizantes fosfóricos se garantiza la disponibilidad del nutrimento en cantidades suficientes para las plantas.

Asegura **BERTSCH (1995)** que los suelos jóvenes derivados de cenizas volcánicas, presentan mayores contenidos de P-Total con respecto a los desarrollados a partir de sedimentos meteorizados y redepositados en las áreas bajas tropicales. Agrega que es común encontrar valores de P-Total inferiores a 200 ppm en suelos de los órdenes Oxisol, Ultisol y Alfisol; entanto que los mismos superan las 1000 y hasta 3000 ppm en los Andisoles. Los Vertisoles por su parte son por lo general muy bajos en P-Total, pues sus contenidos se ubican entre 20 y 90 ppm.

Se le atribuye poca importancia al P-Total en la determinación y diagnóstico del grado de fertilidad de los suelos, pese a lo cual siempre se valora.

A.1.2. Fósforo Orgánico

El **P-Orgánico** constituye una fracción importante del P-Total aportando entre el 25% y el 75% de su contenido, el cual según **FASSBENDER (1994)** puede ampliarse hasta un 85%. Se considera que los mayores contenidos de esta fracción corresponden a suelos altamente meteorizados como Oxisoles, Ultisoles y Alfisoles, donde representa según **BERTSCH (1995)**, entre un 60 y un 80% del P-Total.

El **P-Orgánico** esta directamente determinado por la estructura química del material que lo contiene, en el cual los fosfatos del ácido inositohehexas fosfórico (inositol) constituyen la fracción principal, pues aportan hasta el 50%-75%; además de esa fracción, los fosfolípidos, ácidos nucleicos, fosfatos metabólicos y fosfoproteínas proporcionan también aportes importantes.

La caracterización del P-Orgánico se realiza por lo general utilizando la relación C:N:P orgánico, la cual sin embargo es muy variable, habiéndose encontrado valores de 110:9:1 para la misma (**FASSBENDER, 1994**).

Por su naturaleza y origen orgánico existen factores del entorno que determinan la participación de las fracciones tanto orgánica como inorgánica en la definición del P-Total, entre las cuales se tienen los elementos del clima como la temperatura, la lluvia, también la acidez del suelo, la actividad biológica y el desarrollo de los suelos (meteorización); todos ellos intervienen sobre la mineralización del vegetal.

Es por esta razón lógico encontrar altos contenidos de P-Total en localidades donde persisten bajas temperaturas, alta precipitación y acidez del suelo, así como una actividad biológica reducida, todas contrarias a la mineralización.

Se considera que son muy pequeñas las cantidades de P que pueden ser absorbidas por la planta en forma de fosfatos orgánicos solubles, manteniendo por ello poca relevancia nutritiva (**TISDALE et al, 1993**).

Los fosfatos orgánicos pueden ser descompuestos o mineralizados a través de la actividad microbial, mediante la hidrólisis promovida por algunas enzimas presentes en el suelo. Como resultado de la Mineralización del P orgánico, se produce una liberación de fosfatos inorgánicos.

En general, los factores que afectan la nitrificación son los mismos que favorecen la mineralización del P orgánico; manteniendo la reacción un óptimo en temperaturas altas y un rango de pH entre 5,5 y 7.

Al igual que acontece con el N, es factible que ocurra en el suelo una Inmovilización del P al ser tomado en sus cuerpos para convertirlos en formas orgánicas. Se indica que uno de los factores que más influyen en la dirección de la reacción (bidireccional) fosfato mineral a fosfato orgánico, lo constituye la relación C/P Orgánico en el material que se descompone. Si la relación es > 300 hay Inmovilización del P Inorgánico y si es < 200 entonces ocurre la Mineralización.

La forma orgánica del P constituye una importante fuente de reserva no susceptible a insolubilización o fijación, la cual esta disponible para ser absorbida por las plantas una vez que cuente con condiciones favorables para su Mineralización.

Interpretando y orientando la información anterior hacia la caña de azúcar, se infiere el importante abastecimiento y aporte que la alta deposición de material vegetal en las plantaciones proporciona, lo cual representa otro argumento favorable para la no quema de plantaciones de caña y la producción de materia prima sin el uso de fertilizantes químicos, o en su caso con empleo racional.

A.1.3. Fósforo Inorgánico

El **P-Inorgánico** ha merecido al contrario del N, mayor atención que las formas orgánicas, como lo demuestra la gran cantidad y diversidad de “**sustancias extractoras**” empleadas en su determinación.

MALAVOLTA (1980a) ubica al P en tres compartimentos principales en el suelo:

(a) **FOSFORO FIJADO:** el cual puede estar a su vez como:

- ✓ P fuertemente adsorbido
- ✓ P ligado al aluminio (**P-Al**)
- ✓ P contenido en la red cristalina mineral
- ✓ P ligado al hierro (**P-Fe**)
- ✓ P ligado al calcio (**P-Ca**)

(b) **FOSFORO DISPONIBLE:** fósforo inorgánico que puede estar como:

- ✓ P débilmente adsorbido
- ✓ P presente en la solución del suelo (**P-H₂O**)

(c) **FOSFORO ORGANICO:** originario del ácido nucleico, los fosfolípidos y el fosfoinositol.

En su interacción esas tres formas establecen equilibrios dinámicos que modifican la disponibilidad del elemento para las plantas.

Las formas de P que se encuentra fuertemente **Adsorbido o Fijado**, conocido también como **nativo o precipitado**, forman parte de la red cristalina del suelo (**CHANG y JACKSON, 1957; BESOAIN, 1985**) y no son disponibles para las plantas.

Las formas químicamente bien definidas y cristalizadas es factible distinguirlas en el P-inorgánico; así como también otras formas no tan bien cristalizadas o amorfas.

Dicha fracción esta compuesta a su vez por otras tres fracciones de actividad diferencial, en consideración del grado de ligamiento que posean, como se indica seguidamente:

- **FORMAS ACTIVAS:**

- ✓ Fosfatos ligados al calcio (**P-Ca**)
- ✓ Fosfatos enlazados al aluminio (**P-Al**)
- ✓ Fosfatos ligados al hierro (**P-Fe**)

- **FORMAS RELATIVAMENTE INACTIVAS:**

- ✓ Fosfatos ocluidos en hidróxidos de Al, Fe y Mn a través de los procesos de cristalización.
- ✓ Fosfatos adsorbidos al complejo coloidal.

Entre los *fosfatos cristalinos cálcicos* se tienen el fosfato monocálcico [$\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$], el fosfato dicálcico (CaHPO_4), el fosfato tricálcico y sus formas hidratadas; así como también las apatitas hidroxidadas [$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$] y sus variantes fluorada y carbónica.

En los *fosfatos cristalinos alumínicos* destacan el fosfato alumínico (**variscita**) y los fosfatos cristalinos férricos o ferrosos (**vivianita y estrengita**)

Se han identificado además fosfatos cristalinos complejos, derivados de la transformación de los fertilizantes, como acontece con las **taranakitas, fosfatos octacálcicos, gorceixita, crandalita** y otros (FASSBENDER, 1994).

El **P-Ocluido** esta formado por un revestimiento de óxidos de Al o Fe, o de concreciones, que evitan la reacción de estos fosfatos en la solución del suelo, motivo por el que son inertes y poco disponibles para la plantas. Dicho revestimiento sólo puede ser disuelto (parcial o totalmente) en condiciones anaeróbicas.

La presencia y dominio de una u otra de estas formas de fosfatos en el suelo, esta definida según **BERTSCH (1995)**, **TISDALE et al (1993)** e **INPOFOS (1988)**, por la interacción de las características propias de los diferentes fosfatos, con algunas propiedades de los suelos como son:

- ✓ Grado de meteorización y desarrollo del suelo.
- ✓ Grado de acidez (pH)
- ✓ Textura
- ✓ Régimen de humedad.

A.2. Solubilidad

La solubilidad de los compuestos desempeña un papel determinante en la presencia de las fracciones en el suelo y su eventual disponibilidad para las plantas, prevaleciendo la forma de P-Fe conforme el grado de meteorización es mayor, debido a que su solubilidad es

inferior respecto a las otras dos. En este sentido la solubilidad de esas formas puede representarse como sigue:

$$\boxed{\mathbf{P - Ca > P - Al > P - Fe}}$$

De acuerdo con lo anterior, es factible encontrar formas solubles de P-Fe en condición de reducción en los Oxisoles; en el caso de los Ultisoles predominan tanto el P-Fe como el P-Al y en los Andisoles es más común encontrar P-Ca cuando el pH es superior a 6 y P-Al en pH menores.

La presencia de una u otra forma química de fosfato esta condicionada por el grado de acidez del suelo, valorada a través de su pH. En suelos cuya acidez es básica o neutra (pH > 7) predominan las formas P-Ca; entanto que cuando esta es ácida hay dominio de P-Al y P-Fe, todo lo cual es explicable con base en la solubilidad y la estabilidad de los fosfatos y la actividad del Ca, Fe y Al **BERTSCH (1995); BAHIA y BRAGA (1975); CHANG y JACKSON (1957); FASSBENDER, (1994); GOEDERT *et al* (1986b); INPOFOS (1988); MALAVOLTA (1976, 1980ab, 1981, 1982a, 1983); RAJAN y FOX (1975); TISDALE *et al* (1993).**

La lentitud con que ocurren los procesos químicos de transformación, hacen que aún en suelos con pH de 5,5 coexistan cantidades apreciables de formas P-Ca propias de pH superiores.

La literatura indica que las formas de fosfatos presentes en el suelo, dependen de la textura (granulometría) en un alto grado, concluyendo que en los suelos de textura arcillosa están presentes formas de P-Fe y P-Al y en los suelos arenosos las de P-Ca.

Las arcillas de los suelos dominados por **Esmectitas** (arcillas 2:1) como los Vertisoles, no poseen una superficie reactiva amplia por lo que retienen cantidades modestas de P. Esta situación pudiera acontecer en los suelos cañeros de Guanacaste, donde la Esmectita forma parte principal de los suelos pesados (vertisoles) de varias localidades.

En virtud de la dependencia de algunas formas químicas a las condiciones de oxireducción (redox) que presente el suelo, el régimen de humedad es determinante. Se tiene que el P-Al se acumula bajo regímenes Acúicos, entanto que el P-Fe se acumula en regímenes Ústicos; bajo condiciones de humedad extrema (inundación, pantános) se favorece por su parte la presencia de P-Fe (ferrosos).

A diferencia de otros nutrimentos el P no se pierde por lavado, aunque si por la erosión del suelo. De acuerdo con **CHAVERRI (1958)**, los fosfatos de Fe y Al son muy importantes en algunos suelos de Costa Rica.

En un estudio de fraccionamiento del P inorgánico realizado con suelos ácidos de Brasil (**BAHIA y BRAGA, 1975**), por medio del cual se determinó y cuantificó los contenidos de

P disponible en la solución del suelo (P-H₂O), así como el P fijado al Al (P-Al), al Fe (P-Fe) y al Ca (P-Ca), se encontró predominancia de P-Fe y P-Al con respecto al P-Ca.

Los valores promedio de esas formas fueron P-Al (76,4 ppm), P-Fe (106,6 ppm), P-Ca (55,3 ppm) y el P retenido (ocluso) dentro de los óxidos hidratados de Fe y Al fue de 135,2 ppm; lo cual ratifica la condición distrófica de esos suelos pobres en Ca.

Puede deducirse asimismo, que los suelos menos intemperizados ricos en Ca intercambiable y pH elevado, deberán ser más ricos en P-Ca y pobres en P-Fe y P-Al. La aplicación de un encalamiento fuerte inducirá en esa condición un incremento del P-Ca, reduciendo consecuentemente las otras dos formas.

Trasladando estos principios a los suelos cultivados con caña de azúcar en Costa Rica, se infiere que en la mayoría de ellos predominan las formas P-Fe y P-Al por su condición distrófica, de alta y mediana acidez. En el caso particular de Guanacaste es igualmente esperable el predominio de la forma P-Ca por su condición eutrófica y mayor pH, lo que no elimina la presencia de las otras dos formas en ambas condiciones.

MALAVOLTA (1983) expone en el Cuadro 1, un detalle de las formas de P presentes en algunos suelos de Brasil.

**CUADRO 1.
FORMAS DE P PRESENTES EN ALGUNOS SUELOS DE BRASIL.**

FORMA	ORIGEN	% APROXIMADO DEL TOTAL
Fosfato de inositol Acidos nucleicos Fosfolípidos Otras	O R G A N I C O	10-60
P-Ca P-Fe P-Al P-Adsorbido* P-Ocluso (Fe)	I N O R G A N I C O	5-30 10-20 < 10 1 40-90

* en arcilla, oxidos hidratados y carbonatos.

Fuente: **MALAVOLTA (1983)**.

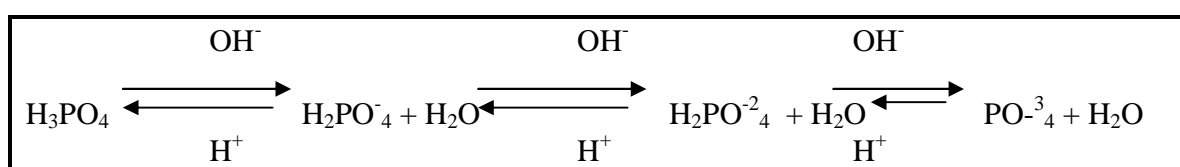
A.3. Fósforo Disponible para las Plantas.

En lo que respecta al **P Disponible o Adsorbido** al complejo coloidal, es sobresaliente el hecho de que los fosfatos muestran una elevada fuerza de retención, siendo potencialmente capaces de desplazar al resto de aniones. Es esperable por ello, que una aplicación de fosfatos en dosis elevadas promueva una mayor disponibilidad inicial de otros aniones (SO₄) para la planta, aunque una posible carencia con el tiempo.

Las cantidades de P-soluble contenidas en la solución del suelo son muy bajas (inferiores a 0,2 ppm) y se encuentran presentes en sus dos formas iónicas más solubles (H_2PO_4^- y HPO_4^{2-}) en concentraciones que son dependientes del grado de acidez (pH) del medio (GOEDERT *et al.*, 1986b).

Se tiene predominio de la forma H_2PO_4^- en pH entre 2 y 7 y de HPO_4^{2-} , en pH de 7 a 12 (BERTSCH, 1995); puede deducirse que en el caso de los suelos ácidos la forma H_2PO_4^- es la que domina, lo que es extensivo y aplicable para muchos de los suelos cañeros de Costa Rica.

Es el valor de pH portante, el que va a definir la forma predominante de P presente en el suelo de la siguiente manera:

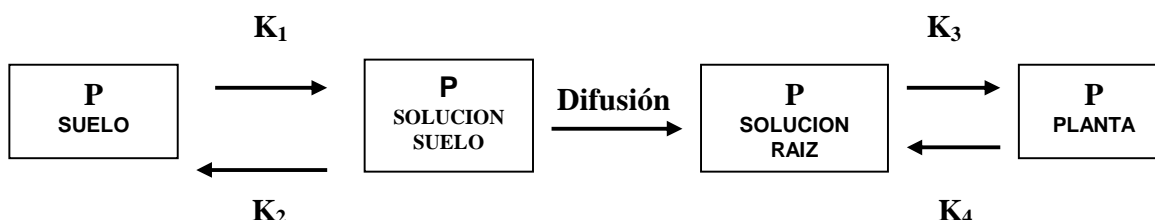


De acuerdo con ese modelo de reacción, con valores de pH entre 5 y 6 casi todo el P se encuentra para fines prácticos en las formas absorbibles H_2PO_4^- y HPO_4^{2-} , predominando como se indicó la primera. En valores de pH entre 6 y 7 las concentraciones de estas dos formas iónicas tienden a igualarse, predominando la HPO_4^{2-} a pH mayores.

Cualquier fuente de P que se adicione al suelo, sea esta de naturaleza orgánica o inorgánica proveniente de fertilizantes industrializados o fosfatos naturales, deberá primero para poder ser utilizada por las plantas, transformarse en una de esas dos formas iónicas favoreciendo el enriquecimiento rápido de la solución del suelo (P – H_2O).

Es importante reiterar que la solubilidad de los compuestos fosfatados de Ca, Al y Fe es muy similar en rangos de pH del suelo entre 6 y 7.

La planta de caña se nutre de P casi exclusivamente a través de la solución del suelo, mecanismo que puede representarse como sigue:



El valor K corresponde y representa la velocidad en que ocurre la reacción química de transformación en el suelo. Los cuatro factores más relevantes son: cantidad (P-suelo), velocidad (K_1/K_2), intensidad (P-solución) y difusión. Cuando las condiciones de crecimiento vegetativo son normales, la velocidad K_4 es prácticamente nula y la velocidad de absorción del P por parte de la planta a partir de la solución del suelo (K_3) es alta favoreciendo con ello su absorción.

La cantidad de P presente en la solución del suelo es muy importante desde el punto de vista productivo y nutricional, ya que el crecimiento de la planta es proporcional a su concentración.

A.4. Fijación en el suelo

Por Fijación de aniones se entiende el proceso o la serie de procesos que ocurren en el suelo, o arcilla, por medio del cual ciertos elementos químicos esenciales para el desarrollo vegetal se convierten desde una forma soluble o intercambiable a formas insolubles, inadsorbibles o no cambiables, como por ejemplo, la fijación del P en suelos ricos en Fe_2O_3 y Al_2O_3 . El proceso tiene mayor trascendencia en los suelos ácidos, orgánicos, pero también en los alcalinos.

El poder de Fijación de P de muchos suelos es de tal magnitud, que la regulación de su disponibilidad se convierte en uno de los problemas más difíciles de resolver para la obtención de cosechas satisfactorias.

De acuerdo con **BESOAIN (1985)**, la adsorción de aniones en los suelos puede ocurrir por causa de tres mecanismos principales en los cuales intervienen el Fe y el Al:

- 1) **Adsorción Específica.**
- 2) **Adsorción No Específica**
- 3) **Transformación**

La “**fijación de fosfatos**” constituye un término de uso muy común entre técnicos y agricultores, principalmente los de la zona tropical; resulta sin embargo cierto, que hay gran confusión respecto a su verdadero significado, el cual ha causado por lo general confusión y malas interpretaciones.

Se piensa generalmente que el P aplicado en suelos con alta fijación de fosfatos hace el elemento no asimilable en su totalidad, considerando inclusive inútil aplicar fertilizantes fosfóricos a plantas que crecen en esas condiciones.

La realidad es que no todo el P permanece insoluble, sino que algunas pequeñas cantidades se mantienen disponibles en la solución del suelo. Entre mayor sea la proporción total de fosfatos presentes en el suelo, mayor será la cantidad liberada al medio (solución) y disponible para ser absorbida por las raíces de la planta. De igual forma, entre menor sea la proporción de P-Total en el suelo, mayor retención e indisponibilidad sufrirá este en la fracción insoluble.

La fijación de P se refiere estrictamente a un proceso por medio del cual los fosfatos solubles en agua son inmovilizados en el suelo, debido a la formación de fosfatos insolubles en agua. Esto acontece porque los iones Al y Fe solubles en pH moderadamente ácidos se combinan con los iones fosfatos formando compuestos insolubles.

Se tiene así que el fosfato monocálcico de superfosfato, el cual es soluble en agua, es convertido en fosfatos insolubles de Fe, Al y Mn cuando este se aplica en suelos ácidos; en caso de que la adición ocurra en suelos calcáreos alcalinos, ese fosfato soluble es convertido en fosfatos bi y tricálcicos insolubles, generando en ambas situaciones la correspondiente insuficiencia nutricional. La inmovilización ocurre en forma casi inmediata luego de entrar el P en contacto con el suelo.

A lo anterior hay que agregarle que no todo el P que absorben las plantas proviene necesariamente de la solución del suelo, ya que las raíces están en capacidad de disolver los fosfatos que se encuentren próximos a ellas, a través de la actividad que ejercen los pelos radiculares finos recién formados.

De lo anterior es fácil deducir que entre mayor sea el contacto de los pelos radiculares con las partículas fosfatadas del suelo, mayor será también la cantidad de fosfato "*fijado en el suelo*" que es absorbida por la planta. La colocación y distribución del fertilizante fosfatado en la zona con mayor densidad de pelos radiculares redundará en significativos efectos favorables.

Es conocido que el P se fija a las partículas arcillosas coloidales, donde los iones fosfato reemplazan al Sílice o a los radicales hidróxidos de la micela arcillosa. El P fijado por la montmorillonita puede ser más disponible que el P combinado con el Fe, Al o Ca.

En los suelos ácidos el Fe y el Al solubles pueden reaccionar directamente con el abono fosfatado insolubilizando los mismos, siendo mayor el grado de fijación cuando los óxidos de Al y Fe aumentan (ALVARADO, 1984).

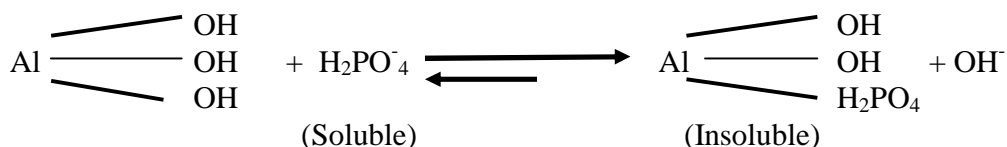
Tanto **BERTSCH (1995)**, **SANCHEZ y UEHARA (1980)** y **FASSBENDER (1994)** como **TISDALE et al (1993)** y **RAIJ (1984)**, aseguran que la fijación del P esta determinada por factores como:

- ✓ Mineralogía de las arcillas.
- ✓ Cantidad presente de arcilla (a mayor contenido mayor fijación)
- ✓ Cantidad de coloides amorfos
- ✓ Contenidos de Fe, Al y Ca intercambiables
- ✓ Contenido de materia orgánica
- ✓ Tiempo de reacción

En lo correspondiente a mineralogía se tiene que los óxidos amorfos incluyendo la Alofana fijan más P que los cristalinos; en ese último grupo las arcillas 2:1 fijan menos P que las

A.4.2. Reacción con óxidos hidratados

Por lo general, los suelos ácidos contienen altas cantidades de óxidos hidratados insolubles de Fe, Al, Ti y Mn; estos óxidos son de naturaleza coloidal, por lo que los iones fosfato son atraídos y retenidos en la superficie de las partículas, formando fosfatos aluminicos y/o hierro. La reacción en el caso de Al es la siguiente:



Este tipo de fijación parece ser importante en los suelos ácidos debido a los altos contenidos de óxidos hidratados de Fe y Al, ocurriendo además en un amplio rango de pH.

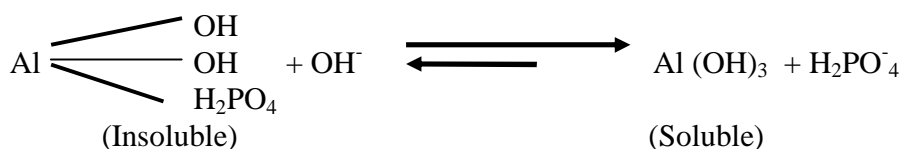
A.4.3. Reacción con Arcillas Silicatadas

Se ha comprobado que las arcillas tanto del tipo 2:1 como 1:1 son capaces de fijar fosfatos. Se presume que la combinación del fósforo directamente con las arcillas puede ocurrir de dos maneras.

- Por reacciones de reemplazo superficial de grupos OH^- expuestos en el cristal del mineral de arcilla.
- Por remoción de iones de Fe y Al en los bordes del cristal y la formación de hidroxifosfatos.

A.4.4. Intercambio Iónico

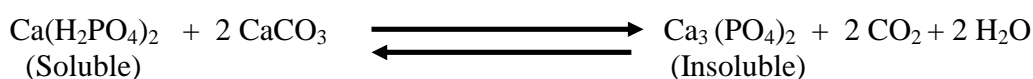
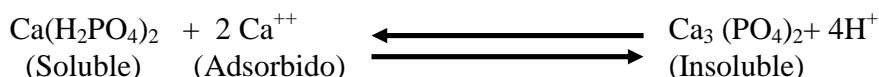
La investigación ha verificado que tratando suelos que contienen P adsorbido en su micela con soluciones portadoras de aniones tales como arseniato, hidroxilo, oxalato y otros, ocurre un reemplazo del P al que se denomina **Intercambio Aniónico** y se expresa de la siguiente manera:



Esta acción de intercambio del fosfato es mayor en arcilla de tipo 1:1 respecto a las 2:1.

A.4.5. Reacción con Fosfatos en Suelos Alcalinos y Calcareos

La fijación del P también ocurre en los suelos de naturaleza alcalina y calcárea, la cual se atribuye a la formación de compuestos fosfatados de calcio. En dicho caso los fosfatos solubles pueden reaccionar con el Ca^{++} intercambiable y con el CaCO_3 presente, como se anota a continuación:



En suelos alcalinos con CaCO_3 libre este puede reaccionar con el fosfato y precipitar con la consecuente insolubilización del mismo. La fijación podría acontecer en intervalos de pH que varían entre 7 y 9.

A.5. Fijación en Suelos Volcánicos

Los suelos originados a partir de la deposición de materiales de origen volcánico y clasificados Taxonómicamente como Andisoles, ocupan un área importante del total cultivado con caña de azúcar en Costa Rica (aproximadamente un 22%), como lo señalan **CHAVES y ALVARADO (1994)**; quienes ubican el orden de importancia en Inceptisoles, Ultisoles, Andisoles, Vertisoles, Entisoles, Molisoles y Alfisoles.

Los suelos de este orden taxonómico mantienen un rejuvenecimiento continuo de materiales lo que induce también un enriquecimiento nutricional constante (**BERTSCH, 1995 y CANESSA et al, 1986**).

Se caracterizan por ser generalmente profundos de color oscuro, lo que va en función de la magnitud de las deposiciones. Están dominados por arcillas de **Alofana** que son silicatos de aluminio hidratados de características coloidales no cristalinos y muy inestables, lo que les confiere gran actividad y reactividad (**BESOAIN, 1985**).

Al hidratarse en busca de una mayor estabilidad se liga con la Materia Orgánica, formando organominerales que confieren buena estructura al suelo y alta capacidad de retención, en especial de los fosfatos (**CHAVES y ALVARADO, 1994**). Físicamente poseen una baja densidad aparente lo que potencia y favorece su compactación; entanto que nutricionalmente se catalogan como moderadamente fértiles, requiriendo de la aplicación de prácticas de manejo que los acondicionen para la agricultura (ej. encalado).

ALVARADO (1984) señala que el material volcánico presente en los suelos de Costa Rica es variable en su composición, puesto que en la región de Guanacaste el vulcanismo es de naturaleza Riolítica del Cuaternario; mientras que en el resto del país el vulcanismo es Holocénico de composición andesítico-basáltico, lo que también se traduce en las características de las alofanos de cada lugar.

Estudios realizados por **FASSBENDER (1994)** en América Central, en los cuales evaluó el grado de retención de fosfatos, concluyó que la mayor parte de los suelos fijó entre 25 y 35% del fósforo adicionado.

A.6. Sobreencalamiento

El empleo de cantidades elevadas (sobredosis) de encalado en los suelos ácidos ha generado alguna polémica, principalmente en lo que respecta al posible efecto de fijación de fosfatos que podría en teoría inducirse por el empleo de dosis altas de cal, tal como aconteció cuando se pretendió encalar con base y visualizando apenas el incremento del pH, como se practicaba en las zonas templadas, desconociendo el efecto “buffer” de los suelos tropicales.

En el caso de la caña de azúcar hay sin embargo varios aspectos que considerar al respecto:

- a) Las características anatómico estructurales y fisiológicas de la caña favorecen en alto grado la satisfacción nutricional de la planta (**CHAVES SOLERA, 1988 y 1999**). Las características de insolubilidad de la cal y la relativa inmovilidad del fósforo, favorecen la actividad del eficiente y vigoroso sistema radicular que posee la caña.
- b) En la caña se utiliza por lo general como fuente para realizar el encalado el CaCO_3 , cuya reactividad es significativamente menor respecto a la del CaO , lo que reduce la velocidad de reacción en dosis altas y con ello la capacidad de fijación de fosfatos.
- c) Resultan nutricionalmente más preocupantes las reacciones secundarias que ocurren sobre la solubilidad de los micronutrientes, los cuales son inhabilitados para la absorción por la planta, induciendo con ello deficiencias de Zn, Fe, Mn, Cu y B.
- d) De no existir contacto directo entre el P y la cal, el grado de reacción se limita significativamente lo que minimiza la posible fijación.
- e) La granulometría de los materiales comerciales de encalado nacionales mantienen una proporción adecuada entre partículas gruesas y livianas, asegurando con ello una reacción balanceada en el tiempo (**CHAVES, 1993**).

Por todo lo anterior, podría aseverarse que la fijación potencial de fosfatos por sobreencalamiento de suelos ácidos resulta poco relevante; manteniendo la inducción de deficiencia de micronutrientes más significancia desde el punto de vista nutricional.

A.7. Disponibilidad en el suelo

La disponibilidad del P en el suelo depende de varios factores relacionados e influenciados por la fuente empleada, el tipo de suelo, el clima y el método de aplicación utilizado entre muchos otros. Algunos autores (**DROSSDOFF *et al.*, 1975; FIXEN, 1996; LEIVA, 1986; INPOFOS, 1988**) citan los siguientes como relevantes:

- a) Cantidad de arcilla (textura) presente
- b) Tipo de arcilla
- c) Época de aplicación
- d) Grado de aireación del suelo
- e) Grado de compactación
- f) Humedad
- g) Contenido de P en el suelo (forma química presente)
- h) Temperatura
- i) Grado de acidez del suelo (pH)
- j) Presencia de otros nutrientes (antagonismos y sinergismos)
- k) Cultivo o variedad empleada
- l) Tiempo de reacción del P en el suelo
- m) Contenido de Materia Orgánica

A.8. Remoción por la Caña

De acuerdo con la información internacional relativa a la capacidad de extracción de P del suelo por parte de la caña de azúcar, se concluye que ese nutriente es en promedio absorbido en menores cantidades respecto a otros de orden primario como el K y el N.

La caña de azúcar está dotada de un vigoroso sistema radicular que le provee una elevada capacidad de exploración (horizontal y vertical) en el suelo, que conduce a manifestar su reconocida rusticidad, al contar con gran potencial para satisfacer sus necesidades inmediatas, tanto nutricionales como de agua (**CHAVES, 1998 y 1999**).

Una amplia revisión de literatura efectuada por **CHAVES (1986 y 1999)**, demostró que el promedio mundial (53 reportes) de extracción de P era de 0,27 kg/TM de tallos industrializables, cuyo rango era a su vez de 0,06 y 0,7 Kg para una amplitud de 0,64 kg/TM, entre el valor máximo y el mínimo observados.

De acuerdo con la información recabada por ese autor, el modelo principal de extracción nutricional promedio para los macronutrientes era el siguiente:

$$\mathbf{K > N = Si > Ca > S > P > Mg}$$

Se generaron además a partir de esa información otros modelos alternativos definidos por los siguientes patrones:

$\mathbf{K > N > Ca > P - Mg - S}$
$\mathbf{K > N > Ca > Mg > P}$
$\mathbf{K > N > Mg > Ca > P}$
$\mathbf{K > N > Ca > P > Mg}$
$\mathbf{K > N > S > Ca > Mg > P}$
$\mathbf{K > N > S > Mg > P > Ca}$
$\mathbf{N > K > Ca > Mg > S > P}$

Se nota en todos ellos que el P ocupa los dos últimos lugares en cuanto a cantidad extraída por la planta de caña, alternando su posición con el magnesio (Mg) y el azufre (S).

A.9. Aportes al Sistema

Al igual que acontece con otros nutrientes como el K, Ca y Mg existen varias vías a través de las cuales es factible reincorporar o hacer ingresar P al sistema suelo con el objeto de enriquecer el sustrato y restituir las pérdidas que existan; entre los cuales pueden citarse los siguientes:

- ✓ Aplicación de fertilizantes
- ✓ Incorporación de residuos de origen orgánico
- ✓ Quema de la planta y los rastrojos
- ✓ Reabastecimiento por parte de las diferentes fracciones del suelo.

A.9.1. Uso de Fertilizantes

Representa el método convencional y más tradicional para adicionar P al suelo, aunque también el más caro sobre todo si no se realiza con el cuidado y la racionalidad debida.

Por sus características, propiedades y actividad en el suelo, el P requiere necesariamente ser manejado con criterios estrictamente técnicos, a efecto de maximizar su potencial nutricional.

Como se mencionó, su limitada solubilidad, su reconocida Inmovilidad y su alta fijación, así como su elevada reactividad a la acidez del suelo, hacen que su empleo requiera de la adopción de técnicas y estrategias muy particulares a efecto de alcanzar la eficiencia y

efectividad deseadas. A estas circunstancias se suman su alto costo, pues la unidad de P es una de las más caras en cualquier fórmula fertilizante.

A.9.2. Residuos Orgánicos

En la actualidad el empleo de residuos de naturaleza orgánica ha despertado un gran interés comercial y nutricional, motivo por el cual se procura incorporar valor agregado a los mismos y resolver además los problemas de salud pública que estos pueden generar.

En el caso de la caña de azúcar la producción de residuos agroindustriales es importante (**CHAVES *et al*, 1999ab**). Se tiene la producción de una cantidad importante de rastrojo vegetal en las plantaciones comerciales, el cual se recomienda reducir en tamaño e incorporar al suelo como “*Compost*”, con el objeto de alcanzar beneficios nutricionales.

La cachaza viene a representar también un importante fertilizante orgánico (y fosfórico) de gran potencial nutricional, como lo verificaran **BERROCAL (1988); CHAVES, RODRIGUEZ Y GUZMAN (1999); CHAVES Y GUZMAN (1999); CHAVES, BERMUDEZ Y PESSOA (1999ab); CHAVES, ANGULO Y GUZMAN (1999); CHAVES Y GUZMAN (1993 ab); ANGULO y CHAVES (1999 ab)**.

Como residuo derivado de la Industria alcoholera la vinaza tiene también un gran potencial fertilizante, tal como lo han revelado los estudios de **CHAVES (1985); ALFARO (1999); RODRIGUEZ *et al* (1999); BERROCAL (1988); ALFARO (1996); ORLANDO FILHO (1983); SUBIROS y MOLINA (1992); SUBIROS (1987); SALAS (1998) y RODRIGUEZ (1987)**.

La investigación ha logrado demostrar el alto valor que esos y otros residuos orgánicos poseen como materiales fertilizantes para la caña de azúcar, lo cual surge de sus contenidos y propiedades nutricionales, entre los cuales el P ocupa una posición relevante.

A.9.3. Quema

La quema de plantaciones favorece en el caso de la caña de azúcar, la reincorporación parcial del P extraído por la planta al sistema suelo, a través de las cenizas producto de la incineración vegetal. Parte importante del fósforo extraído del campo, es sin embargo perdido por estar contenido en los tallos industrializables que van a los molinos.

Como se indicó para el caso del N y el K (**CHAVES, 1998c y 1997b**) esta vía devuelve al suelo una fracción importante de los nutrimentos extraídos, excepto el N y el S, que se pierden por Volatilización.

A.9.4. Reabastecimiento por el Suelo

Se comentó ampliamente en el capítulo inicial (A.1), la participación de algunos mecanismos de orden químico que favorecen el aporte de algunas fracciones del suelo al enriquecimiento del P intercambiable y soluble en la solución del suelo, por tanto, disponible para ser absorbido por las raíces.

A.10. Contenidos en el Suelo

Se considera que la deficiencia de P es una circunstancia común a la mayoría de suelos agrícolas del mundo, motivo por el cual se le ha bautizado como *“la llave maestra de la agricultura”*.

Esta demostrado que en la mayoría de suelos las concentraciones de P son muy bajas, tal como se comentó con anterioridad, encontrándose las mayores reservas en los fósforos secundarios.

Los suelos cañeros de Costa Rica no son la excepción a esa norma (ALPIZAR, 1976 y BERTSCH, 1987) pues las concentraciones de P son por lo general deficientes como lo demuestra el Cuadro 2.

CUADRO 2.
CONTENIDO QUIMICO DE P EN LOS SUELOS
CAÑEROS DE COSTA RICA.

REGION	MUESTRAS (N°)	pH	SATURACION ACIDEZ (%)	Cmol (+)/l		ug/ml	
				CICE	Al	P	Fe
Guanacaste	159	6,36	0,61	26,37	0,16	17,32	64
Esparza	51	5,77	3,46	8,70	0,30	9,92	65
Valle Central	118	5,28	9,39	6,28	0,59	8,43	+100
San Carlos	317	5,44	4,58	10,04	0,46	3,83	91
Turrialba	145	5,07	12,55	7,25	0,91	5,94	+100
Pérez Zeledón	104	4,98	36,64	4,64	1,70	4,95	+100
Promedio	894	5,48	6,54	10,55	0,69	8,40	+100

De acuerdo con los criterios de diagnóstico nacional, todas las regiones exceptuando Guanacaste, poseen en promedio contenidos de P en el suelo inferior al Nivel Crítico establecido en 10 ug/ml. A lo anterior se agregan las condiciones de acidez variable (media-baja) de la mayoría de suelos, cuyos contenidos de Fe y Al son relativamente altos, generando un ambiente limitante para el desarrollo y capacidad exploratoria de las raíces.

Esa condición nutricional de nuestros suelos genera una expectativa de respuesta nutricional elevada en prácticamente todas las regiones productoras de caña del país, lo que ubica al P como un nutrimento cuya aplicación es prioritaria.

Es importante al pretender interpretar posibles insuficiencias de P en el suelo, comprobar previamente la inexistencia de otros factores que pudieran estar induciendo su no absorción, como podrían ser: daños de raíz ocasionados por plagas y enfermedades, compactación, presencia de nemátodos, condiciones de inundación, estrés por sequía, alta salinidad, alta acidez asociada con concentraciones tóxicas de Fe, Al o Mn, entre muchas otras.

A.11. Humedad y Transporte en el Suelo

Como se indicó, la disponibilidad de P para las plantas depende entre otros factores de la cantidad adsorbida en la superficie de las partículas, de su actividad en la solución del suelo, de la capacidad del P adsorbido de poder pasar a la solución hasta alcanzar las raíces.

El transporte del P en la solución del suelo es un proceso altamente dinámico, señalado como un mecanismo limitante para la disponibilidad de ese nutriente para las plantas, el cual está regulado por factores como: contenido de agua en el suelo, la interacción de P y los coloides del suelo, así como la distancia a recorrer hasta contactar las raíces de la caña.

El transporte del P en el suelo ocurre por el mecanismo de la **Difusión**, el cual es debido al movimiento térmico y al azar, de los iones o moléculas en un medio líquido. El gradiente de concentración provoca un movimiento mayor de los iones en dirección a los puntos opuestos. Este mecanismo ha sido propuesto casi unánimemente como el encargado del transporte del fósforo en el suelo (**RUIZ, 1986**).

Se ha establecido una relación directa entre el contenido de agua del suelo y el grado de difusión del P. Un incremento en el contenido de humedad hace que la “película” de agua de las partículas sólidas del suelo sea más espesa, disminuyendo la interacción ión-coloides y paralelamente, aumentando la cantidad del nutriente disuelto. La viscosidad del agua adquiere también importancia en este sentido.

La textura y la mineralogía del suelo también exhiben un efecto indirecto sobre la difusión del P; se considera que la difusión es menor en los suelos arcillosos al relacionar la interacción coloides-fósforo. La presencia de óxidos de Fe dificulta la difusión del P en el suelo, debido a su elevado poder de fijación.

La difusión del P responde fundamentalmente al nivel de P en el suelo y al contenido de humedad. La literatura reporta un incremento en el contenido de fósforo en el vegetal, conforme aumenta la disponibilidad del agua para las plantas.

RUIZ (1986) determinó al evaluar en dos suelos ácidos brasileños, cuatro dosis de P (0, 60, 120 y 240 $\mu\text{g P/cm}^3$ suelo) y tres potenciales matriciales (-0,01, -0,04 y -0,30 MPa), una disminución de los niveles críticos foliares de P de la soya (utilizada como planta indicadora) con la reducción del potencial matricial, atribuida a un efecto conjunto sobre el transporte del nutriente y sobre el crecimiento radicular.

Las variaciones del contenido de humedad fueron más significativas que las de las dosis de P, siendo el efecto más crítico en el suelo más arenoso. Se comprobó que la incorporación de dosis menores de P complementadas con un manejo adecuado del agua, presentaron un efecto positivo más acentuado, que el obtenido con dosis mayores y variaciones pronunciadas en el contenido de agua.

Cabe al respecto recordar que el P es un elemento casi inmóvil en el suelo, que no se traslada con las corrientes de humedad de un lugar a otro, como si lo hacen muchos otros nutrientes. Es por este motivo que las reservas de P contenidas en las capas más profundas del suelo no resultan fácilmente aprovechables a los cultivos que generalmente tienen sus raíces en la capa superior del suelo. Sólo plantas como la caña de raíces profundas, poseen la capacidad de explotar esas reservas.

B. EL FÓSFORO EN LA PLANTA

El fósforo (P) forma parte de los 16 nutrientes considerados como esenciales para el crecimiento de las plantas, lo que significa que sus funciones no pueden ser sustituidas y desempeñadas en igual forma por otro nutriente, limitando con ello el máximo potencial productivo de la caña.

Conjuntamente con el N, K, Ca, Mg y S, el P constituye uno de los 6 macronutrientes esenciales.

B.1. Funciones

Como funciones básicas del P en la caña pueden citarse las siguientes:

- ✓ Participa en la formación de la molécula de sacarosa (Glucosa – 1 – Fosfato + Fructuosa \longrightarrow Sacarosa + H_3PO_4).
- ✓ Favorece el almacenamiento de energía en las células a través de las Coenzimas Adenocina Difosfato (ADP) y Adenocina Trifosfato (ATP).
- ✓ Es un proveedor de energía a partir del ATP (compuesto clave en el metabolismo energético).
- ✓ Participa en la síntesis de numerosos compuestos fosforilados.
- ✓ Su deficiencia afecta la actividad fotosintética en grado superior respecto al N y el K, al limitar el transporte electrónico.
- ✓ Forma parte estructural de los ésteres de carbohidratos, fosfolípidos, coenzimas y ácidos nucleicos de la célula.
- ✓ Incrementa el contenido de carbohidratos, aceites, grasas y proteínas.

- ✓ Participa en la fijación simbiótica de Nitrógeno.
- ✓ Acelera la formación de raíces y favorece la producción de retoños.
- ✓ Actúa en el desdoblamiento de los azúcares en la respiración celular.
- ✓ Esta asociado con el transporte electrónico que tiene lugar en la fase aeróbica de la respiración.
- ✓ Mantiene reservas en la semilla a través del ácido fítico.

B.2. Absorción y Metabolismo

El P es un macronutriente aniónico menos exigido por los cultivos que el Nitrógeno, apareciendo en la materia orgánica en bajas concentraciones.

Como se indicó, el P es absorbido del suelo en la forma de ion ortofosfato primario (H_2PO_4^-) o como ortofosfato secundario (HPO_4^{2-}), dependiendo de la condición de acidez del suelo. Hay que recordar que el ácido ortofosfórico H_3PO_4 genera por disociación tres especies iónicas cuya presencia depende del pH del medio: H_2PO_4^- , HPO_4^{2-} y PO_4^{3-} .

Las raíces de la planta de caña son capaces de absorber el P a partir de concentraciones muy bajas. Es importante hacer notar que la absorción del P está fuertemente influenciada por la concentración de Mg presente en el suelo, estableciéndose una relación sinérgica entre ambos nutrientes.

La absorción corresponde al ingreso del elemento en forma iónica en los espacios intercelulares o en cualquier otra sección de la organela celular (pared, membrana, citoplasma, vacuola, mitocondria, cloroplasto, etc.).

La absorción del P de la solución del suelo por parte de las raíces se realiza a través del proceso de **DIFUSIÓN**, el cual se define como el movimiento del ion en una fase acuosa estacionaria a distancias cortas.

Dicho proceso de naturaleza activa opera a través del diferencial (gradiente) de concentración que se establece en la superficie de las raíces, a través del cual los iones de P se difunden de la posición de mayor concentración (moles/l) a la de menor concentración. La rápida absorción del elemento por la raíz crea un déficit y con ello un gradiente entre las zonas próximas a la raíz, respecto a la solución del suelo que regula la difusión del P hacia las raíces.

En un revelador estudio, **SAUERBECK *et al* (1976)** observaron aspectos interesantes de la absorción del P por parte de la caña de azúcar. El mismo se efectuó en un cañaveral de Santa Bárbara de Heredia empleando fósforo radiactivo (^{32}P), evaluando tres profundidades (5, 15 y 20 cm) y tres distancias de colocación respecto a la planta (0, 20 y

40 cm del centro del surco); en todos los casos se inyectó 1,28 mCi de ^{32}P en el suelo (Andisol) a ambos lados del surco de caña.

Luego de 10, 25, 38 y 53 días de instalado el experimento se recolectaron muestras foliares que se analizaron, a efecto de valorar la absorción de ^{32}P . Se encontró en las muestras de 10 días una mayor absorción cuando la aplicación se realizó a 5 cm de profundidad, independientemente de la distancia a la cepa: a los 25 días, las aplicaciones hechas a los 30 cm aportaron la menor cantidad de P al igual que ocurrió a los 10 días.

La absorción de ^{32}P fue mayor cuando se adicionó el fertilizante marcado a 5 o 15 cm de profundidad. Pese a todo, no hubo diferencias significativas entre los tratamientos en las fechas de muestreo.

A los 53 días se notó un equilibrio en la absorción, mostrando todos los tratamientos una actividad similar. Fue notorio que todas las hojas nuevas desarrolladas durante el experimento absorbieron más ^{32}P respecto a las que ya estaban formadas cuando se aplicó el nutrimento.

Se observó además, que el fertilizante colocado a 5 y 15 cm de profundidad suple más fósforo que a 30 cm durante los 25 días posteriores a la aplicación. Queda así demostrada la importancia que tiene la capacidad exploratoria del sistema radicular de la caña, lo cual se maximiza a mayor tiempo y menor profundidad.

B.3. Transporte

Dentro de la planta, el P inorgánico es almacenado en las raíces o transportado a las secciones superiores donde, a través de varias reacciones químicas, es incorporado en los compuestos orgánicos vitales.

La translocación del P en la planta de caña puede ocurrir en sentido tanto acropeto como basipeto. Se ha demostrado que la redistribución de P a través del floema ocurre también en su forma inorgánica, pese a lo cual el P se encuentra predominantemente en la planta en forma orgánica y una pequeña fracción inorgánica.

El abastecimiento de fosfatos de las hojas jóvenes ocurre a partir del P absorbido directamente por las raíces; aunque también del P es movilizado y translocado a partir de las hojas más viejas, motivo por el cual el fósforo se clasifica como un elemento móvil dentro de la planta.

De acuerdo con **JACKSON y HAGEN (1960)** citados por **MARTIN ORIA *et al* (1987)**, el período de tiempo transcurrido entre la absorción e incorporación del fosfato a los procesos metabólicos de la planta es muy rápido; asegurando que luego de 10 minutos el 80% del fosfato ya está incorporado a compuestos orgánicos.

B.4. Contenidos Nutricionales

Son numerosos los factores del entorno como los internos de la planta que inducen variación en las concentraciones del P presentes en los tejidos de la caña, entre los que se mencionan:

- ✓ Sección de la planta (tejido) muestreada y analizada.
- ✓ Edad del tejido diagnosticado.
- ✓ Características físico-químicas del suelo (substrato).
- ✓ Variedad de caña cultivada.
- ✓ Características climáticas del lugar, principalmente en lo concerniente a lluvia, humedad, temperatura, luz, radiación solar y viento.
- ✓ Manejo actual y anterior de la plantación, principalmente en lo referente a fertilización, uso de enmiendas (orgánicas-inorgánicas) y encalado.
- ✓ Contenido de humedad del suelo y el tejido.
- ✓ Textura del suelo.
- ✓ Práctica de la quema de tallos y rastrojos vegetales.
- ✓ Condición fitosanitaria de la plantación.
- ✓ Grado de compactación del suelo.

Las concentraciones de P contenidas en los tejidos son bastante estables a través del ciclo vegetativo de la planta. De acuerdo con **MALAVOLTA (1982a)**, los contenidos de P en la hoja diagnóstico (+3) varían entre 0,16% y 0,24% entre los 4 y 8 meses de edad en la caña planta y, entre 0,18% y 0,22% en el ciclo de soca.

ANDERSON y BOWEN (1994) señalan asimismo, que el Nivel Crítico foliar (3 a 9 meses) del P en la caña esta entre 0,08% y 0,35%; el valor crítico en la vaina (3-6 meses) es por su parte de 0,19% y 0,22%.

JONES et al (1991); MILLS y JONES (1996), ubican como concentraciones bajas por su parte, aquellas establecidas entre 0,15% y 0,17%, suficientes entre 0,18% y 0,30% y altas las superiores a 0,30%.

El cuadro 3 resume los contenidos de P propuestos por **GARCIA ESPINOZA (1984)**, para calificar varios estados nutricionales de la caña de azúcar en México, según tejido diagnóstico utilizado (hojas e internudos 8-10).

CUADRO 3.
CONTENIDOS DE P SEGÚN TEJIDO ANALIZADO
DE CAÑA DE AZUCAR EN MEXICO.

INDICE	FOSFORO (%)	
	FOLIAR	8-10
ALTO	> 0,18	> 0,06
NORMAL	0,14 - 0,18	0,04 - 0,06
LIGERAMENTE BAJO	0,12 - 0,14	-
BAJO	0,10 - 0,12	< 0,04
MUY BAJO	< 0,10	-

FUENTE: GARCÍA ESPINOZA (1984)

Los contenidos del nutrimento en la planta varían de acuerdo con la sección de tejido y la edad del mismo, encontrándose generalmente la mayor concentración en el meristemo (CATANI *et al* 1959).

ORTEGA *et al* (1979) no encontraron por su parte diferencias significativas para el P Inorgánico (Pi) entre edades, ni entre dosis de fertilizante fosfórico, aunque si entre las diferentes secciones y tejidos de la planta, como se indica en el Cuadro 4.

Se infiere de la información contenida en ese cuadro, que las mayores concentraciones de fosfatos se localizan en las láminas foliares y los tejidos meristemáticos, no mostrando diferencia estadísticamente significativa estos últimos con respecto a las hojas +1 y +2. Los contenidos de las vainas y entrenudos son de 2 a 3 veces menores respecto al de los tejidos fotosintéticamente activos, manteniendo la raíz las menores concentraciones.

CLEMENTS (1955) citado por ORLANDO FILHO (1983), expuso el siguiente orden decreciente de fósforo en los tejidos de la caña: tejidos meristemáticos, tallos en elongación, hojas jóvenes, hojas viejas y caña madura. Determinaron que a medida que los tejidos aumentan su edad, concentran menos P.

ORLANDO FILHO (1976 y 1978) al valorar las concentraciones de P en tres secciones diferentes de la planta, utilizando como sustrato tres tipos diferentes de suelo encontró que en las hojas (conjunto) e individualmente en la hoja +3 hubo disminución de los contenidos hasta el octavo mes, un posterior aumento seguido de una fase de estabilización en los meses finales del ciclo vegetativo (16 meses).

En los tallos se verificó por su parte un decrecimiento del cuarto al octavo mes, a partir de donde se estabilizó. El estudio verificó mayor acumulación de P en las hojas respecto a los tallos, así como diferencias en la concentración del elemento en la planta inducidas por el tipo de suelo.

CUADRO 4.
EFFECTO DE LA EDAD Y LA DOSIS EN LAS CONCENTRACIONES
DE FOSFORO INORGANICO EN DIFERENTES SECCIONES DE LA CAÑA
($\mu\text{g P}/100 \text{ g peso fresco}$).

SECCION VEGETAL	kg P ₂ O ₅ /ha (2,9 meses)			kg P ₂ O ₅ /ha (6,4 meses)		
	0	150	250	0	150	250
Meristemo	19,18	19,23	21,43	20,27	30,49	19,75
Hojas +1 y +2	21,75	23,79	36,91	20,29	25,01	22,34
Láminas 3 a 6*	41,64	40,65	50,03	23,13	26,89	26,65
Vainas 3 a 6	5,98	8,54	12,55	7,35	9,71	9,33
Entrenudos 3 a 6	8,21	14,53	12,50	11,42	14,83	11,27
Láminas 7 a 10*	32,60	40,65	37,90	25,44	25,88	27,03
Vainas 7 a 10	5,52	8,16	11,51	8,83	6,81	7,89
Entrenudos 7 a 10	2,07	4,66	7,69	3,53	5,03	6,83
Raíces	1,76	2,91	3,66	4,02	18,95	4,27

FUENTE: ORTEGA *et al* (1979).

*** Láminas sin nervadura central.**

B.5. Síntomas de Deficiencia

En condiciones de insuficiencia del elemento ocurre una redistribución interna del P de los órganos más viejos hacia los más nuevos y en activo crecimiento, motivo por el cual es en aquellos donde se manifiestan primeramente los síntomas de deficiencia (ANDERSON, 1995; MALAVOLTA, 1980ab).

Las plantas de caña de azúcar que carecen de P y padecen su insuficiencia, se caracterizan por presentar una coloración verde azulado o morado en las hojas (en ocasiones aparecen un color rojo o púrpura, las cuales se vuelven angostas y más pequeñas de lo normal. Las hojas más viejas se secan en las puntas y en los bordes del limbo, llegando inclusive a morir.

Los tallos se desarrollan poco por lo que son pequeños y muy delgados, lo que es extensivo a sus internudos. El encepamiento es deficiente, disminuyendo el número de tallos/cepa, especialmente los tallos secundarios y terciarios lo que afecta la población.

El desarrollo radicular es también limitado al producir raíces cortas de poca capacidad exploratoria (horizontal y vertical) en el suelo, lo que se traduce en una severa disminución del ahijamiento y el macollamiento; además de problemas en la capacidad de tolerancia de la planta a suelos ácidos, condiciones de sequía, infertilidad y volcamiento de las plantaciones.

La insuficiencia de P en la planta se traduce en una significativa reducción del tonelaje de caña y azúcar, así como de la duración de la vida comercial de la plantación.

Varios autores se han referido a la sintomatología característica de la deficiencia de P en la caña de azúcar, entre los que pueden citarse los siguientes: ANDREIS (1975), MARTIN ORIA *et al* (1987), ORLANDO FILHO (1983), ANDERSON y BOWEN (1994), CHAVES (1999) y MALAVOLTA (1976, 1980ab, 1983), ORLANDO FILHO *et al* (1994).

C. RESPUESTA DE LA CAÑA A SU ADICIÓN

El objetivo fundamental de la práctica de la fertilización sea esta realizada con materiales de origen orgánico o inorgánico, es suplir al suelo los nutrimentos esenciales que este no posee o dispone en cantidades insuficientes, para satisfacer los requerimientos de la planta de caña de manera que posibiliten la obtención de producciones rentables y competitivas.

Se ha comprobado que el crecimiento de las plantas es proporcional a las cantidades de P presentes en la solución del suelo, siempre y cuando no existan factores que limiten su absorción.

El estudio de la compleja química del fósforo en el suelo y en la planta y, sus implicaciones económicas en la producción de los cultivos, ha merecido el interés y dedicación de muchos investigadores y científicos de todo el mundo.

Es por ello, amplia y muy diversa la investigación y experiencia comercial que sobre la adición de P a la caña se posee a nivel mundial y también en Costa Rica.

Señala CHAVES (1996) al respecto, que *“el fósforo representa un nutrimento de respuestas altamente satisfactorias y significativas a su aplicación, traducidas en mejoramiento general de los rendimientos agroindustriales de la planta”*.

Agrega el mismo investigador, que el empleo del P en los suelos de origen o influencia volcánica (Andisoles) es fundamental, debido a la fuerte fijación que los mismos mantienen inducida por las alofanas.

Recomienda a su vez, incorporar y complementar su adición con el encalamiento de los suelos de características ácidas o que manifiesten deficiencia al calcio. Asegura que el empleo de rocas fósforicas ha mostrado posibilidades reales de uso en el cultivo de la caña de azúcar en el país.

Tal como se indicó, muy numerosa es la investigación realizada en el país relacionada con la caña de azúcar, como lo demuestran los estudios efectuados por ZUÑIGA (1972), PACHECO (1977), RAMIREZ (1964), RUIZ (1977), ZUÑIGA (1991), SAUERBECK *et al* (1976), LEIVA (1986), MESEN *et al* (1996), CHAVES *et al* (1985b), CHAVES y CORRALES (1985a), ARIAS VENEGAS (1959); CHAVES y ARREA (1986); CHAVES *et al* (1999), ALFARO (1988), GARCIA (1973), BARQUERO y VARGAS (1988), CHAVES Y ALVARADO (1994), ANGULO *et al* (1996abcd), BARQUERO (1989), ROBLES (1984), RODRIGUEZ y CHACON (1993), BARRANTES y CHAVES (1999c), CALDERON (1999ab), FASSBENDER y MOLINA (1969) y

ALPIZAR (1976). Dichos estudios evalúan diversos aspectos relacionados con la nutrición y la fertilización fosfórica del cultivo de la caña de azúcar.

C.1. Interaccion Cal-Fósforo

Los mejores resultados productivos agroindustriales y las mayores respuestas de la caña en términos de eficiencia económica, se han alcanzado cuando el P se adiciona en forma asociada con el calcio a través del encalado, como lo han verificado **ALFARO (1988)**, **MESEN *et al* (1996)**, **BARRANTES y CHAVES (1999c)**, **CALDERON (1999ab)**, **ZUÑIGA (1991)**, **FASSBENDER y MOLINA (1969)**.

Los resultados alcanzados por **BARRANTES y CHAVES (1999c)** en un Ultisol de Pérez Zeledón luego de cuatro cosechas de la variedad SP 71-5574 (Cuadro 5) revelan diferencias estadísticas significativas entre tratamientos. Las dosis promedio de cal superaron al testigo en más de 5 t/ha (6%) de caña y 0,6 t de azúcar (5%), siendo levemente inferiores en rendimiento industrial (1,3 kg). Las dosis de P mostraron amplia variación con respecto al testigo en producción de caña (21,8 t/ha) y azúcar (3,03 t), equivalentes al 28,3% y 28,7%, respectivamente. Integralmente la adición de 150 Kg de P₂O₅ sin cal produjo la mayor concentración de sacarosa (140,87 kg) y el mayor tonelaje de azúcar (14,25 t/ha); la mayor producción de caña la generó la incorporación de 2 t de CaCO₃ con 100 kg de P₂O₅/ha. En virtud de las ventajas que aporta la cal y lo reducido de su costo, recomendaron sin embargo el empleo de 150 kg de P₂O₅ con la aplicación al voleo e incorporación de 1 t/ha de CaCO₃.

CUADRO 5.
INTERACCION DE 3 DOSIS DE CAL Y 4 DE CAL-FOSFORO EN UN ULTISOL DE PEREZ ZELEDON, PROMEDIO DE 4 COSECHAS, CLON SP 71-5574.

TRATAMIENTOS		FIBRA (%) CAÑA	RENDIMIENTO INDUSTRIAL kg AZUCAR/t	PRODUCCION (t/ha)		PRT (%)	RELACION CAÑA/ AZUCAR
CaCO ₃ (t)	P ₂ O ₅ (kg)			CAÑA	AZUCAR		
0	0	16,73 a	137,45	70,91 c	9,75 d	100	7,3
0	100	16,47 ab	135,28	89,13 abc	12,06 bc	124	7,4
0	150	15,85 ab	140,87	101,13 ab	14,25 a	146	7,1
0	200	16,61 ab	137,10	98,54 abc	13,51 abc	139	7,3
1	0	15,47 b	137,90	80,36 bc	11,08 cd	114	7,2
1	100	16,20 ab	136,90	99,52 ab	13,62 ab	140	7,3
1	150	16,44 ab	136,77	103,47 ab	14,15 ab	145	7,3
1	200	15,84 ab	136,79	97,74 abc	13,37 abc	137	7,3
2	0	16,68 ab	134,12	80,26 bc	10,76 cd	110	7,5
2	100	16,64 ab	135,95	104,29 a	14,18 ab	145	7,4
2	150	16,26 ab	135,98	97,97 abc	13,32 abc	137	7,4
2	200	16,27 ab	136,33	99,35 abc	13,54 abc	139	7,3
PROMEDIO		16,29	136,79	93,56	12,80	131	7,3
CV (%)		3,58	4,32	7,52	8,91	-	-

FUENTE: BARRANTES y CHAVES (1999c).

CALDERÓN (1999 a) por su parte, determinó en un Ultisol de Turrialba con el clon Q 96 (Cuadro 6) que la aplicación del carbonato de calcio y el P, fueron determinantes en el aumento de la producción de azúcar con respecto al tratamiento testigo, lo cual mostró clara

superioridad en rentabilidad. A pesar de que se encontró respuesta positiva a la aplicación individual del carbonato de calcio y el P, es conveniente hacer uso conjunto de ambos componentes, pues el estudio demostró que su interacción produjo mejores resultados agroindustriales que cuando son aplicados en forma independiente. En cuanto a la dosis de cal a recomendar a un productor, quedó demostrado que la mejor es la de 1,5 t/ha. Con respecto a la dosis de fósforo, si bien 200 kg de P₂O₅ /ha fue superior, desde el punto de vista práctico así como de flujo de caja; para un pequeño agricultor no es aplicable, pues este nutrimento es caro. Una dosis ubicada en el rango de 120-150 kg/ha P₂O₅ en caña planta, según criterio técnico, puede recomendarse con buen acierto para la región de Turrialba.

CUADRO 6.
INTERACCION DE 4 DOSIS DE CAL Y 3 DE P EN UN ULTISOL DE
TURRIALBA, PROMEDIO DE 4 COSECHAS, CLON Q 96.

TRATAMIENTOS		RENDIMIENTO kg Az/t	t/ha		PRT (%)	RELACION BENEFICIO/ COSTO
t CaCO ₃	kg P ₂ O ₅		CAÑA	AZUCAR		
0	0	132,33	58,26	7,87	100	1,73
0	120	130,80	76,66	10,39	132	1,93
0	200	130,92	85,88	11,18	142	1,91
1	0	131,58	85,92	11,47	146	2,00
1	120	130,33	88,56	11,58	147	1,93
1	200	131,04	100,62	13,09	166	2,00
1,5	0	134,78	88,31	11,77	149	1,99
1,5	120	134,18	95,60	13,16	167	2,08
1,5	200	133,56	108,66	14,81	188	2,14
3	0	132,96	80,97	10,69	136	1,83
3	120	131,02	108,32	14,43	183	2,05
3	200	134,11	107,00	14,43	183	2,04
PROMEDIO		132,30	90,40	12,07	-	1,97
CV (%)		5,12	27,02	17,91	-	-
SIGNIFICANCIA		NS	NS	NS	-	-

*PRT= DIFERENCIA (%) RESPECTO AL TESTIGO CON BASE EN TONELADAS DE AZUCAR (t/ha).

FUENTE: CALDERON (1999a)

C.2. Forma de Colocación

Señalan GOEDERT *et al* (1986ab) y FIXEN (1995), que la eficiencia y la adecuación de los métodos de aplicación de los fertilizantes fosfatados pueden ser influenciadas por las características del suelo, de la planta, del clima y de la fuente de P utilizada.

La forma de colocación es importante porque la adsorción e insolubilización de los fosfatos solubles, pueden reducirse al disminuir el volumen de suelo con el cual reacciona el fertilizante adicionado, para lo cual se destacan varias alternativas.

En el caso de la caña de azúcar es posible utilizar métodos de aplicación de P como los siguientes:

- Colocado en el fondo del surco de siembra
- Aplicado en el entresurco (superficial o incorporado)
- Aplicado en la superficie del suelo e incorporado luego de adicionar al voleo
- Aplicado al voleo superficialmente (sin incorporar)
- Adicionado al lado o sobre de la banda de caña (superficialmente).
- Aplicación por la vía foliar.

En términos generales se tiene que la aplicación al fondo del surco es la forma más común de adición del P durante el ciclo de caña planta en Costa Rica. En el caso de las socas es la aplicación lateral o sobre la banda de plantas de caña.

De no existir problemas de fijación del P en el suelo, podrían esperarse pocas diferencias entre los métodos de aplicación en virtud de que las raíces de la caña están en capacidad de llegar hasta el fertilizante, por lo que su falta de movilidad no resulta ser una limitante tan seria.

La valoración de la forma de colocación del P en el suelo y su efecto sobre los rendimientos agroindustriales indica, como lo detalla el Cuadro 7, que su incorporación al fondo del surco en un estudio realizado en un Ultisol de Turrialba (CHAVES, 1997a), fue superior (30%) respecto al tratamiento sin fósforo (-P); así como también respecto a su aplicación en el entresurco que fue similar al anterior, al voleo y sobre la superficie del terreno sin incorporar. Fue notorio el efecto positivo inducido por el P sobre la calidad de los jugos de la variedad Q 96, luego de evaluarse durante tres cosechas.

**CUADRO 7.
PRODUCCION DE CAÑA Y AZUCAR SEGÚN FORMA DE COLOCACION DEL
P EN TURRIALBA, VARIEDAD Q 96, PROMEDIO DE TRES COSECHAS.**

FORMA DE COLOCACIÓN	PORCIENTO		RENDIMIENTO INDUSTRIAL Kg AZUCAR/t	TM/ha		PRT (*)
	PUREZA	FIBRA		CAÑA	AZUCAR	
FONDO DEL SURCO	89,6	14,5	121,70	157,10	19,03	130
ENTRE SURCO	85,9	14,2	117,38	161,35	19,01	130
AL VOLEO	85,9	14,5	115,70	161,61	18,67	127
SUPERFICIAL	86,1	14,0	115,64	158,88	18,41	125
SIN APLICACIÓN (-P)	83,4	14,1	111,34	132,59	14,67	100
PROMEDIO	86,2	14,3	116,34	154,31	17,96	122

FUENTE: CHAVES (1997a).

C.3. Estudios de Dosis

El uso eficiente de los fertilizantes fosfatados esta ligado a la aplicación de una dosis que genere la mayor productividad agroindustrial sin afectar la calidad, la que a su vez muestre la mayor tasa de retorno marginal económico.

La definición puntual de las dosis óptimas debe establecerse para cada tipo de suelo, variedad cultivada, condición de manejo, ciclo vegetativo y número de cosechas efectuadas lo cual necesariamente requiere de un plan de investigación dinámico y ajustable con el tiempo.

Es fundamental definir las superficies de respuesta que establezcan los ámbitos de respuesta para un determinado nutrimento, considerando los factores citados anteriormente.

Como se comentó, los Andisoles son suelos que poseen una elevadísima capacidad de retención de fosfatos, lo que motivó un estudio (CHAVES y CORRALES, 1985a) con el objeto de evaluar la respuesta de la caña en una zona alta del Valle Central (1.250 msnm), a la adición de P sin que previamente se corrigiera la acidez. Los resultados indican (Cuadro 8), que las producciones de todos los tratamientos fueron mayores en toneladas de caña y azúcar/ha respecto al testigo sin P; se observó también, una significativa reducción de la capacidad productiva entre el primer y segundo corte, que se manifestó más ampliamente en los tratamientos con dosis menores de fósforo. Estos resultados sugieren la necesidad de encalar durante la siembra y reencalar en ciclo de retoño, con el objeto de disponer más P a la planta (CHAVES y ALVARADO, 1994).

**CUADRO 8.
RENDIMIENTOS AGROINDUSTRIALES CORRESPONDIENTES AL ESTUDIO
DE DOSIS DE P REALIZADA EN LA LUISA. PROMEDIO DE 2 COSECHAS.**

DOSIS P ₂ O ₅ Kg/ha	PROMEDIO			PRT (*)
	RENDIMIENTO INDUSTRIAL (Kg Az/TM)	PRODUCCION CAÑA (TM/ha)	PRODUCCION AZUCAR (TM/ha)	
TESTIGO ABSOLUTO	125,05 a	118,2 c	14,6 ab	127
0	120,14 a	99,0 c	11,5 ab	100
100	117,55 a	125,4 ab	14,1 ab	123
200	116,23 a	144,7 a	16,6 a	144
300	118,08 a	121,4 abc	13,8 ab	120
400	124,47 a	130,3 ab	16,0 a	139
500	117,77 a	120,5 abc	13,6 ab	118
PROMEDIO	119,9	122,8	14,3	124
CV (%)	6,93	12,07	16,0	-

FUENTE: CHAVES y CORRALES (1985).

Fertilización base: 140 kg N y 150 kg K₂O/ha.

Variedad Cultivada: H 44-3098 cosechada a 21 y 13 meses de edad.

Tratamientos con por la misma letra no difieren estadísticamente entre sí (Duncan 5%).

LEIVA ACUÑA (1986) determinó (Cuadro 9) en un Ultisol distrófico de Pérez Zeledón, utilizando el clon Q 68, que todas las dosis (7) de P adicionadas al suelo superaron al testigo en producción de caña y azúcar (TM/ha), mostrando las dosis de 420 y 180 Kg P₂O₅/ha los mayores tonelajes, respectivamente. Todas las dosis exceptuando la de 360 Kg superaron al testigo en lo concerniente a rendimientos industriales, demostrado una mejora sustancial de los jugos.

**CUADRO 9.
RESPUESTA DE LA CAÑA A LA ADICIÓN DE OCHO DÓISIS
DE P EN UN ULTISOL DE PEREZ ZELEDÓN, CAÑA PLANTA, CLON 68.**

TRATAMIENTO kg P ₂ O ₅ /ha	PORCIENTO		RENDIMIENTO INDUSTRIAL (kg AZUCAR/TM)	PRODUCCION (TM/ha)		PRT (%)
	POL CAÑA	PUREZA		CAÑA	AZUCAR	
TESTIGO ABSOLUTO	13,85	89,04 ab	105,92	62,70 c	6,63	104
0	13,41	87,08 ab	100,33	63,70 c	6,36	100
60	13,67	87,14 ab	102,73	72,40 abc	7,51	118
120	13,64	90,02 ab	104,60	77,43 ab	8,13	128
180	13,74	87,78 ab	104,67	78,63 ab	8,25	130
240	13,28	88,61 ab	100,98	74,20 abc	7,50	118
300	13,74	92,34 a	104,10	66,23 bc	6,93	109
360	12,70	85,62 b	95,80	68,90 abc	6,63	104
420	13,26	88,62 ab	101,31	80,63 a	8,21	129
PROMEDIO	13,48	88,47	102,19	71,65	7,35	116
CV (%)	7,16	4,98	8,84	13,10	18,57	-

FUENTE: LEIVA ACUÑA (1986).

*Tratamientos seguidos de la misma letra no difieren estadísticamente entre sí (Duncan 5%).

Trabajando en la misma región **RUÍZ MELENDEZ (1977)** evaluó las variedades B 47-44 y H 44-3098 en 30 tratamientos de N-P-K con y sin adición de azufre, utilizando un diseño modificado de superficie de respuesta denominado “Guadalupe”.

Los resultados revelan un incremento en el tonelaje de caña y azúcar hasta 664 Kg de P₂O₅/ha con respuesta máxima entre 664 y 830 kg, el cual estuvo asociado con la respuesta del crecimiento de la planta. No se encontró efecto significativo sobre los jugos y el rendimiento industrial.

BARQUERO (1989) encontró por su parte en un estudio realizado en un Ultisol de Cutris (90 msnm) de San Carlos, donde evaluó tres dosis crecientes de CaCO₃ (0-750-1500 kg/ha) y cinco de P₂O₅ con el clon Pindar (0, 100, 200, 300 y 400 kg/ha), excelente respuesta al P no así a la cal y a la interacción Ca-P. Se determinó con base en las curvas de regresión, que la dosis de 200 kg de P₂O₅/ha era la más económica y rentable.

C.4. Interacción Densidad de Siembra vs Fósforo

BARQUERO y VARGAS (1988) al evaluar la interacción de tres dosis de P₂O₅ (0-100-200 kg/ha) y tres densidades de siembra (2, 3 y 4 chorros/surco) en San Carlos, encontraron en ciclo planta con el clon H 44-3098, que su respuesta en el Inceptisol fue favorable.

La productividad de caña y azúcar fue estadísticamente significativa, no encontrando diferencias entre las dosis de 100 y 200 kg P₂O₅/ha; la concentración de sacarosa en los tallos no mostró diferencia significativa, como tampoco la hubo para las densidades y la interacción densidad x P. Seguidamente se anotan las producciones desagregadas según dosis.

DOSIS Kg P ₂ O ₅ /ha	PRODUCCION (TM/ha)		PRT (%)
	CAÑA	AZUCAR	
0	114,5	10,5	100
100	139,8	12,4	118
200	151,4	13,6	130

Fuente: **BARQUERO y VARGAS (1988)**.

Otra prueba experimental realizada en un Ultisol de Pérez Zeledón (**BARRANTES y CHAVES, 1999b**), determinaron (Cuadro 10) al evaluar 6 dosis crecientes de P respuestas con significancia estadística (5%) para las variables de producción agroindustrial, en la cual todas las dosis de P superaron al testigo en rendimiento industrial y producción de caña y azúcar (t/ha). La concentración de azúcar en la planta fue ampliamente mejorada (entre 6,6 y 11,4 kg/t) por las dosis de P. Con la producción de caña la contundencia fue también manifiesta, verificando una diferencia entre 10,4 y 29,3 TM/ha; existe una tendencia de incremento del tonelaje conforme aumenta la dosis de P. La producción de azúcar (t/ha) expresó el mismo comportamiento de las dos variables anteriores, marcando el testigo y las dosis de 50 y 100 kg de P₂O₅/ha diferencias estadísticas según tuckey (5%) con respecto al resto de dosis. Todas las dosis superaron en producción de azúcar en más del 23% (2,02 t) al testigo. El mejor índice productivo en todos los órdenes fue obtenido por la dosis de 400 kg de P₂O₅/ha, la cual superó al testigo en 11,39 kg de sacarosa (8,9%), 29,3 t (42,2%) de caña/ha y 4,89 t (5,47%) de azúcar/ha.

CUADRO 10.
EVALUACION DE 6 DOSIS CRECIENTES DE P EN UN ULTISOL
DE PEREZ ZELEDON, CLON SP 71-5574, PROMEDIO DE 3 COSECHAS.

Dosis kg P ₂ O ₅ /ha	PORCIENTO EN CAÑA		RENDIMIENTO INDUSTRIAL kg AZUCAR/t	PRODUCCION TM/ha		PRT (%)	RELACION CAÑA/ AZUCAR
	PUREZA	FIBRA		CAÑA	AZUCAR		
0	76,44	16,44 ab	128,57 b	69,51 c	8,94 d	100	7,8
50	78,04	16,84 a	137,19 ab	79,92 bc	10,96 cd	123	7,3
100	78,54	16,11 b	138,38 ab	86,77 ab	12,01 bcd	134	7,2
150	84,52	16,18 ab	137,02 ab	94,96 ab	13,01 ab	145	7,3
200	73,00	16,29 ab	135,16 ab	92,99 ab	12,57 abc	141	7,4
400	78,32	16,26 ab	139,96 a	98,84 a	13,83 a	155	7,1
PROMEDIO	78,14	16,35	136,05	87,17	11,89	133	7,4
CV (%)	2,61	3,02	4,22	10,40	11,04	-	-

FUENTE: **BARRANTES y CHAVES (1999b)**.

Es importante señalar que no todos los estudios han reportado mejoramientos productivos inducidos por la adición de P al suelo, como lo reveló el estudio efectuado por **CHAVARRIA, VILLALOBOS y CHAVES (1999)**, en un Inceptisol de Esparza, Puntarenas. En dicho caso el testigo (-P) superó a todas las dosis evaluadas (50, 100, 150 y 200 kg de P_2O_5 /ha) en lo concerniente a producción de azúcar; en el tonelaje de caña hubo un efecto positivo con la adición de 100 y 150 kg.

C. 5. Uso de Rocas Fosfóricas

Considerando su naturaleza semiperenne y lo prolongado de su ciclo vegetativo, muchas veces se ha considerado factible y técnicamente valioso para efectuar la aplicación de P, el empleo de rocas fosfóricas de lenta solubilidad, mayor residualidad y disponibilidad en el tiempo, en los programas de fertilización comercial de las plantaciones de caña. Por esa razón, se estableció en un *Andic humitropept* de Juan Viñas (1.180 msnm), un experimento donde se valoró rocas fosfóricas de Carolina del Norte, Centro Florida y Centro Florida Acidulada (40% de H_2SO_4) sin encalamiento previo, respecto al Superfosfato Triple como fuente fosfórica de mayor solubilidad, aplicando en todos los casos 4 dosis: 0, 100, 200 y 400 kg de P_2O_5 /ha. Los resultados indican que la roca de Central Florida fue luego de dos cosechas, la más eficiente en producción (TM/ha) de azúcar y los 100 kg de P_2O_5 /ha la mejor dosis; estos resultados posibilitan el empleo complementario (o suplementario) de fuentes de P de lenta liberación y mayor residualidad, como una alternativa para plantaciones de caña de ciclo vegetativo prolongado (**CHAVES, RAMIREZ y SALAZAR, 1985b; CHAVES y ALVARADO, 1994**).

Luego de cuatro cosechas en un suelo Inceptisol Cañas, Guanacaste donde se evaluó complementariamente tres fuentes de P de solubilidad diferencial, se determinó de que las Rocas Fosfóricas (Carolina del Norte y Florida) de baja solubilidad en dosis de 80 kg de P_2O_5 /ha, resultaron tan eficientes como el Triple Superfosfato (fuente soluble) en la misma dosis, lo que potencializa el empleo de esas fuentes con la caña en esa localidad (**ANGULO, CHAVES y GUZMAN, 1996b**). La cuantificación y conocimiento del efecto residual del P es esencial para establecer la estrategia de manejo adecuada y la economía de la fertilización fosfatada. La valoración de ese efecto no es fácil de efectuar, ya que es el resultado de la interacción de varios elementos como: orden de suelo, fuente, dosis y método de aplicación del P, así como de la forma de preparación de terreno.

C.6. Evaluación de Fuentes

Como se aprecia en el Cuadro 11 existen numerosas fuentes comerciales que pueden ser empleadas para adicionar P al suelo (**ANDERSON, 1995**), permitiendo incorporar además otros nutrimentos esenciales para la caña de azúcar como son N, Ca y S.

CUADRO 11.
COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LAS PRINCIPALES FUENTES COMERCIALES
EMPLEADAS PARA EFECTUAR LA FERTILIZACIÓN FOSFÓRICA.

FUENTE	PORCENTAJE					
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	MgO	CaO	S
Superfosfato Sencillo		18 - 20			20	12
Superfosfato Triple		46			16	
Rocas Fosforicas (Apatitas)		23 - 39			34	
Fosfato Monoamónico (MAP)	10 - 11	48 - 50				
Fosfato Diamónico (DAP)	16 - 18	46 - 48				
Fosfato Adiamónico Saturado	21	53				
Fosfato de Amonio-Sulfato	16	20				15
Urea Fosfatada	29	29				

En un estudio de invernadero realizado por **PACHECO (1977)** con dos suelos cañeros de origen volcánico del Valle Central, donde evaluó 7 dosis crecientes de P₂O₅, encontró que en el suelo de Coopevictoria los rendimientos más altos se obtuvieron con la aplicación de Fosfato Monocálcico y Dicálcico; y los más bajos con el Tricálcico. El suelo de San Isidro de Grecia por su parte, mostró mejores respuestas para el Fosfato Dicálcico respecto a las otras dos fuentes se concluyó con ello que la respuesta de fuentes y dosis de fósforo es diferente en suelos de alta y baja fertilidad integral.

Con el objeto de evaluar cuatro fuentes de P y dos variedades de caña, **BARRANTES y CHAVES (1999 a)** realizaron un estudio en un Ultisol de Pérez Zeledón, donde utilizaron como fuentes el Triple Superfosfato (TSP) cuyo contenido nutritivo es de 46% de P₂O₅ y 13% de Ca, el Fosfato Monoamónico (MAP) con 11% de N y 48% de P₂O₅, Fosfato Diamónico (DAP) con 16% de N y 48% de P₂O₅; además se empleó un tratamiento de Roca Fosfórica (RF) procedente de Carolina del Norte con 33% de P₂O₅ y Ca.

Los resultados del mismo relevaron (Cuadro 12) que no hubo diferencias estadísticas entre los tratamientos, aunque las variedades mostraron alguna diferencia sólo en la producción de caña y azúcar. La SP 71-5574 produjo en promedio 102,3 t/ha de caña y 14,47 t/ha de azúcar; mientras que en la Mex 68-p-23 fueron de 76,70 y 10,85 t/ha, respectivamente. Entre fuentes hubo diferencias importantes, mostrando el MAP la mejor concentración (142,30 kg/t) y el TSP la mayor producción de caña (93,43 t) y azúcar (13,15 t/ha); seguido por el DAP con 92,36 t y 13,03 t/ha, respectivamente. La RF fue la que menor productividad mostró. Individualmente el MAP con la Mex 68-p-23 alcanzó el mejor rendimiento industrial (143,41 kg/t), lo que obtuvo la SP 71-5574 con DAP para la producción de caña y azúcar.

CUADRO 12.
EFFECTO DE CUATRO FUENTES DE P SOBRE 2 VARIEDADES DE CAÑA EN
UN ULTISOL DE PÉREZ ZELEDÓN, PROMEDIO DE 2 COSECHAS.

TRATAMIENTOS		PORCIENTO EN CAÑA			RENDIMIENTO	PRODUCCION (t/ha)		PRT (%)	RELACIÓN CAÑA/AZUCAR
CLON	FUENTE	SACAROSA	PUREZA	FIBRA	INDUSTRIAL kg AZUCAR/t	CAÑA	AZUCAR		
SP	TSP	20,5	89,8	15,7	141,89	104,56	14,84	100	7,0
SP	RF	20,2	89,1	14,5	142,50	94,74	13,50	91	7,0
SP	MAP	20,2	89,7	15,1	141,19	102,88	14,53	98	7,1
SP	DAP	20,3	90,0	16,6	140,34	107,01	15,02	101	7,1
Mex	TSP	19,6	90,3	14,6	139,22	82,29	11,46	100	7,2
Mex	RF	20,3	89,1	14,8	141,51	71,47	10,11	88	7,1
Mex	MAP	20,5	90,7	15,4	143,41	75,33	10,80	94	7,0
Mex	DAP	20,2	91,5	15,4	141,92	77,71	11,03	96	7,1
PROMEDIO		20,2	90,0	15,2	141,50	89,50	12,66	85,3	7,1
CV (%)		3,5	2,7	4,9	4,70	17,51	18,51		-

FUENTE: BARRANTES y CHAVES (1999 a).

Puede concluirse indicando que la selección de una fuente fosfórica se basa no tanto en su eficiencia para suplir P a la caña, sino también y principalmente en su costo. Existen además otros factores que se tornan determinantes como criterios de escogencia, como son la presencia de otros nutrimentos acompañantes (N, Ca, S), la concentración de P₂O₅, el grado de solubilidad y reactividad que mantenga en el suelo.

En Costa Rica se utilizan casi exclusivamente fuentes de P de tratamiento ácido (solubles), como el Triple Superfosfato y los Fosfatos de Amonio (MAP y DAP). Pese a su potencial se tiene verificada la baja solubilidad de los fosfatos naturales (sin acidular) y consecuentemente, su menor eficiencia agronómica respecto a los solubles.

C.7. Micorrizas

Recientemente se viene trabajando a nivel mundial en lo relativo a la asociación simbiótica de hongos micorrízicos con las raíces de algunas plantas, entre ellas la caña de azúcar.

La ventaja potencial que ofrece de esa asociación se basa en el hecho de que las hifas de esos hongos, se constituyen en una extensión y ampliación del sistema radicular de las plantas, lo que provee una mayor superficie para la absorción de nutrimentos, principalmente aquellos que se movilizan en el suelo por el mecanismo de la difusión, como acontece con el P (ZAMBOLIM y SIQUEIRA, 1985).

C.8. Recomendaciones de Dosis por Región

Como se anotó con anterioridad, son muchos los factores que intervienen en la respuesta que una plantación comercial de caña puede proporcionar a la aplicación de P al suelo, sin embargo, pueden apuntarse como los más relevantes los enumerados en el punto A.7.

Como resultado de la amplia y sistemática labor de investigación desarrollada en el país en lo que a nutrición y fertilización de la caña de azúcar se refiere, ha sido posible ir con el tiempo definiendo (construyendo) superficies o ámbitos de respuesta para los principales nutrimentos, lo cual se muestra para el caso del P en el Cuadro 13.

**CUADRO 13.
 AMBITO DE RESPUESTA DE LA CAÑA DE AZUCAR A LA APLICACIÓN DE
 P AL SUELO, SEGÚN REGION PRODUCTORA Y CICLO VEGETATIVO.**

REGION	kg P ₂ O ₅ /ha	
	PLANTA	SOCA**
GUANACASTE*	60-100	50-100
VALLE CENTRAL OCCIDENTAL	130-160	130-160
SAN CARLOS	120-200	100-150
TURRIALBA	130-160	130-160
PEREZ ZELEDON	150-200	180-200
REGIONES ALTAS ***	160-200	130-150
AMPLITUD (MIN-MAX)	60-200	50-200

FUENTE: CHAVES (1999).

* En suelos Molisoles y algunos Vertisoles es recomendable la aplicación de 100-120 kg/ha de P₂O₅.

** Se recomienda aplicarlo como complemento en el segundo retoño (tercera cosecha).

*** Alturas mayores de 1.000 msnm y ciclo vegetativo superior a 15 meses.

Dichas superficies recogen los ámbitos de respuesta agroproductiva al nutrimento, resultantes de las numerosas pruebas de investigación realizadas y la experiencia que en materia comercial se ha adquirido con los años.

En la práctica estos ámbitos representan lo que la planta naturalmente hace al extraer el P del suelo para satisfacer sus necesidades, por lo que su interpretación es productiva y no de orden económico.

Los factores que intervienen estas respuestas nutricionales están determinados por elementos como la variedad sembrada, el orden de suelo cultivado, las propiedades físico-químicas del mismo, las fuentes nutritivas empleadas, el ciclo vegetativo, el clima, el manejo proporcionado a la plantación, el número y la expectativa de cosechas establecidas como meta productiva, motivo por el cual sus valores son muy dinámicos y deben permanentemente revisarse y ajustarse.

Cabe finalmente recomendar en materia de fertilización fosfórica, la importancia de acondicionar el suelo proporcionando un adecuado enclamiento, ya que además de ser efectiva constituye una práctica barata y fácil de realizar. Se recomienda en dicho caso aplicar una cal de alta calidad (PRNT > 80%), la cual debe estar precedida por una buena preparación del terreno en el caso de la caña planta; la cual debe aplicarse superficialmente al voleo y ser incorporada con la rastra, de manera que profundice y amplie sus efectos (CHAVES SOLERA, 1993). La cal debe aplicarse con no menos de 20 días previos a la

adición del P, con el objeto de posibilitar su acción correctiva (acomplejamiento y precipitación del Fe y el Al) y de acidificación del suelo.

En la caña soca se recomienda adicionarla en la banda de siembra y en el entresurco procurando de ser factible su incorporación mediante la desaporca y la aporca.

D. EFECTO SOBRE LA CALIDAD

Es de todos conocido que la composición química de las plantas y la calidad del producto final puede verse significativamente influenciada y mejorada (o afectada) por el suministro de nutrimentos, en este caso el P.

En el caso de la caña de azúcar el empleo del P ha reportado tradicionalmente grandes beneficios, no sólo por sus efectos favorables a nivel agrícola, donde promueve incrementos significativos en la productividad de materia prima en el campo; además de prolongar la longevidad y la vida comercial de la plantación.

En la fase de industrialización de la caña y fabricación del azúcar se ha podido determinar también, que caña procedente de plantaciones con alta disponibilidad de P en el suelo, sea por su elevada fertilidad natural o por la adición óptima a través de la fertilización, posee mayores concentraciones del mismo en el jugo.

La presencia de P favorece y facilita a su vez la clarificación de los jugos, reduciendo con ello los costos y el tiempo involucrado. Asegura **CHEN (1991)**, que las pruebas acumuladas indican que el contenido de fosfatos en el jugo constituye el factor más importante para lograr una clarificación eficiente.

Ese mismo autor señala que los fosfatos encontrados en la caña de azúcar son de naturaleza orgánica e inorgánica; los últimos aparecen como iones de fosfatos libres. En el caso de los fosfatos orgánicos dominan los fosfolípidos, fosfoproteínas, nucleotidofosfato y hexosafosfatos.

Durante el proceso de clarificación del jugo en el ingenio, solamente el fosfato (libre) inorgánico participa; es por ello, que jugos que posean una elevada concentración de fosfatos inorgánicos se tornan industrialmente deseables.

SHARMA et al (1981) citados por **CHEN (1991)**, verificaron la necesidad de incorporar cantidades equilibradas de nutrimentos en el cultivo de la caña de azúcar; notando un aumento significativo en la concentración total de fosfatos al alcanzar la planta su punto máximo de maduración y la presencia de fosfatos inorgánicos en el jugo.

El empleo inadecuado de los fertilizantes fosfatados en el campo, inducen una mayor probabilidad de encontrar más fosfatos orgánicos que inorgánicos en el jugo, afectando con ello su clarificación. Aseguran esos investigadores que en estas condiciones el jugo no responde satisfactoriamente a la clarificación dificultando el proceso.

El Cuadro 14 revela las concentraciones de fosfatos contenidas en el jugo de la caña de acuerdo con la edad de la planta.

CUADRO 14.
TIPOS DE FOSFATOS CONTENIDOS EN EL JUGO DE LA CAÑA
DE ACUERDO CON LA EDAD DEL CULTIVO.

EDAD (meses)	FOSFATO (ppm)			% DEL TOTAL	
	ORGANICO	INORGANICO	TOTAL	ORGANICO	TOTAL
8	150	380	530	28,30	71,70
10	173	453	626	27,64	72,36
12	234	514	748	27,81	72,19
14	250	555	805	31,06	68,94
18	198	350	548	36,20	68,80
20	220	280	500	44,00	56,00
PROMEDIO	204	422	626	-	-
DIFERENCIA CRÍTICA (5%)	NS	42,7	78	-	-

FUENTE: CHEN (1991).

Se aprecia en ese cuadro la mayor presencia de fosfatos inorgánicos en el jugo de la caña, verificando un incremento con la edad hasta los 14 meses para luego decrecer. La literatura señala que jugos conteniendo concentraciones menores de 300 ppm p/v (0,03%) de fosfatos inorgánicos, presentarán dificultades durante la clarificación, obligando a la adición de fosfatos solubles al jugo mixto.

El ajuste de las concentraciones de fosfatos en el jugo a niveles óptimos es común en la actualidad en muchos ingenios azucareros, lo cual se realiza bajo diferentes técnicas y grados de automatización.

HONIG (1953) citado por **CHEN (1991)**, recomienda que el jugo luego de clarificado no debe de contener cantidades de fosfato inorgánico menores de 10 ppm; pues existe el peligro de provocar una alcalinización excesiva que conduce a la presencia de no azúcares en sales de calcio y la consecuente fabricación de azúcares crudos de baja calidad.

Contrario a lo anteriormente expuesto **ORLANDO FILHO, MACEDO y TOKESHI (1994)** aseguran, que la fertilización fosfatada no presenta ninguna influencia sobre las variables de calidad de la caña.

A nivel industrial además del superfosfato triple, es factible emplear con igual eficiencia otras fuentes como superfosfato sencillo, fosfato dicálcico, fosfatos mono y diamónicos y el ácido fosfórico transparente, siendo su costo económico el factor principal de selección entre ellos.

CONCLUSION

Con respecto al P es mucho lo que puede comentarse, pues además de poseer una actividad química dinámica complicada, el nutrimento posee la notoria capacidad de inducir efectos favorables muy significativos e impactantes sobre las variables agronómicas e industriales de la caña de azúcar.

A diferencia de nutrimentos como el K, el P promueve mejoramientos evidentes sobre la germinación, el ahijamiento y el retoñamiento de los cañaverales, lo cual se mide y cuantifica durante la cosecha a través de los tonelajes de caña y azúcar recolectados.

La estrategia inteligente que operan los países desarrollados en esta materia, es aplicar prácticas de manejo visualizadas a largo plazo en sustitución de aquellas cortoplacistas que conducen al agotamiento de la fertilidad del suelo. El mantenimiento de un alto nivel de fertilidad del suelo constituye la única manera de utilizar la tierra con provecho, y de lograr una producción sostenible de caña y también de azúcar.

Hay que reconocer al respecto, que la explotación irracional y sin límites de la fertilidad del suelo, o en su caso el descuido de la misma, harán cierto el sabio refrán que dice **“Padres Ricos-Hijos Pobres”**, en evidente perjuicio de las generaciones y cosechas venideras.

Recuerdan **GOEDERT y SOUSA (1986a)** al respecto, que los fosfatos son además de importantes en los sistemas productivos, recursos naturales no renovables, escasos y sin sucedáneos, por lo que hay imperiosa necesidad de utilizarlos inteligentemente.

La utilización más eficiente de este nutrimento requiere según esos investigadores, de un esfuerzo multidisciplinario, cuya estrategia debe incluir simultáneamente algunas alternativas tales como:

- Minimizar el poder de inmovilización del P por parte del suelo antes de su aplicación.
- Determinar la mejor dosis y el más adecuado modo de aplicación e incorporación.
- Utilizar las variedades más eficientes en la absorción y aprovechamiento del P.
- Desarrollar tecnologías viables que permitan aprovechar mejor las fuentes de P disponibles.
- Maximizar las interacciones positivas existentes entre fertilización fosfórica y otras prácticas agrícolas, y
- Combinar los factores de la producción procurando obtener la máxima productividad por unidad de P incorporada al suelo.

Siendo el P un nutrimento tan caro y necesario, resulta buen negocio revisar lo actuado y corregir lo necesario, con el objeto de racionalizar su empleo y maximizar sus beneficios en procura de lograr una gestión empresarial más competitiva y rentable en condiciones productivas tan difíciles como las actuales.

POTASIO (K)³

INTRODUCCIÓN

El potasio (K) es un nutrimento esencial que con motivo de las interesantes particularidades que presenta en lo concerniente a función, funcionabilidad y efectos productivos en la caña de azúcar, merece ser estudiado en forma especial.

Es mucha la información nacional e internacional que sobre K se ha escrito, pese a lo cual existen y persisten aún en el ambiente técnico, criterios que no responden necesariamente a la realidad y contexto en que debe analizarse y, principalmente, interpretarse la acción nutricional por él promovida cuando se adiciona a través de la fertilización.

En Costa Rica la investigación agronómica que se ha realizado con K, si bien no puede considerarse abundante y profunda, sí ha sido en término general suficiente y revelador, lo que ha permitido conocer con un alto grado de aproximación la respuesta a su adición al suelo, la cual es bastante consistente.

La controversia y confusión sobre su importancia y valor nutricional, se fundamenta en el hecho de que por su naturaleza de macronutrimento primario, por lo general se comparan e interpretan sus efectos con respecto a los promovidos por el Nitrógeno (N) y el Fósforo (P); lo cual es equivocado si consideramos como se indicó, la función y funcionalidad del elemento en el suelo y en la planta y por ende sobre la productividad de campo.

Esta situación ha conducido a que muchos productores y técnicos cuestionen y minimicen la verdadera necesidad de las aplicaciones de K, y otros hasta se pregunten preocupados y sorprendidos, el por qué no se adiciona el elemento al suelo, esto principalmente en la región de Guanacaste, donde motivos estrictamente de criterio profesional y personal han conducido a que algunas unidades productivas importantes hayan prescindido durante muchos años de su adición, a pesar de que los resultados de la investigación agronómica han demostrado lo contrario.

Por tal motivo, resulta de fundamental importancia revisar con objetividad la información generada por la investigación de campo que sobre este nutrimento se ha realizado en Costa Rica, y proveer además la información teórica básica que favorezca una interpretación más acorde al conocimiento existente en la actualidad.

³ Expuesto en el *“XII Congreso Nacional de Técnicos Azucareros de Costa Rica (ATACORI)”*, celebrado en Guanacaste, en el mes de setiembre (2,3 y 4) de 1998. p: 90-102.

El presente artículo procederá por tanto a desarrollar muy someramente el tópico del K, ubicándolo en cuatro contextos diferentes:

- ❖ *El potasio en el suelo.*
- ❖ *El potasio en la planta.*
- ❖ *Respuesta de la caña de azúcar a la adición de potasio.*
- ❖ *Efecto sobre la Calidad.*

A. EL POTASIO EN EL SUELO

A.1 Formas

El elemento se encuentra contenido en el suelo en varias fracciones que presentan una disponibilidad diferencial para las plantas, como se indica seguidamente.

- K- ESTRUCTURAL
- K- RETENIDO O NO INTERCAMBIABLE
- K- INTERCAMBIABLE
- K- SOLUBLE
- K- ORGÁNICO

Es numerosa y muy diversa la información que sobre este importante tópico existe, de la cual los estudios desarrollados por los siguientes autores es esclarecedora y formativa: **MIELNICZUK (1982), RITCHEY (1982), MALAVOLTA Y CROCOMO (1982), ORLANDO FILHO (1978, 1982, 1985), MALAVOLTA (1976, 1980a, 1981, 1982b), CUÉLLAR (1983), HUNSIGI Y SRIVASTAVA (1983).**

El **K- ESTRUCTURAL** se encuentra contenido principalmente en los minerales primarios y secundarios del suelo, como silicatos, feldespatos (ortoclasa y plagioclasa) y micas (biotita, muscovita, ilita, etc). Su liberación y disponibilidad para las plantas es muy baja y lenta, siendo ésta dependiente básicamente del grado de meteorización que exista.

De acuerdo con **MIELNICZUK (1982)**, los minerales potásicos siguen el siguiente orden de meteorización en el suelo:

FELDESPATO > ILITA > MUSCOVITA = BIOTITA

Constituye en términos totales, la fracción mayor de K encontrada en el suelo (90-98%).

El **K- RETENIDO O NO INTERCAMBIABLE**, es por lo general un K retenido entre las capas de tetraedros de las arcillas expandibles como la ilita y la montmorillonita. La liberación del K retenido en esta forma es muy lenta y es por tanto poco importante para satisfacer las necesidades nutricionales inmediatas de las plantas. Su mayor interés lo

presenta la capacidad reconstitutiva que la fracción provee al suelo, con motivo de la disminución que el K intercambiable y de alta asimilación muestra ante los procesos de absorción, fijación o pérdida que pudieran acontecer.

En el caso del **K- INTERCAMBIABLE**, la posibilidad de absorción por parte de la planta es alta cuando esta fracción es también alta, ya que el K es liberado gradualmente al medio para disponerlo a la absorción radicular; constituye una verdadera reserva (la mayor) que evita la pérdida o el agotamiento del nutrimento en el suelo.

Su retención es favorecida por la presencia de la materia orgánica (grupos carboxílicos y fenólicos), siendo también adsorbido por las cargas negativas de las arcillas y los hidróxidos contenidos en el suelo.

La fracción de **K- SOLUBLE** es una pequeña cantidad de K que se encuentra contenido en la solución del suelo, y que conjuntamente con la forma intercambiable, se encuentran disponibles en forma inmediata para las plantas.

Por lo general, la literatura califica al K como un elemento cuyo comportamiento físico-químico se ubica preferentemente en el grupo mineral, pese a lo cual, también reconoce la importancia del **K-ORGÁNICO** como fracción que coloca una importante cantidad de K disponible en el medio, a través de la adición de materiales biodegradables como residuos orgánicos (**BERTSCH, 1995**).

Se indica en la literatura, que el K posee mecanismos que operan sobre las fracciones y que favorecen el reabastecimiento de la fracción cambiante y soluble a partir de las otras formas, la cual como se indicó anteriormente, tiende a disminuir con motivo de las pérdidas del nutrimento en el suelo, inducidas principalmente por la adsorción radicular y también por causa del agua a través de la lixiviación.

Ese proceso de reabastecimiento se verifica a través del equilibrio dinámico que existe entre la fracción cambiante y la solución del suelo.

A.2 Pérdidas en el Suelo

Las pérdidas de este nutrimento que ocurren en el suelo son bajas y por lo general muy inferiores con respecto a las acontecidas con el N y el P.

Los procesos y mecanismos más importantes que intervienen en las pérdidas de K en el suelo son los siguientes:

- ❖ Lixiviación
- ❖ Fijación
- ❖ Remoción por las Plantas
- ❖ Erosión

A.2.1 Lixiviación

Son varios los elementos que intervienen en este tipo de pérdida, entre los cuales los más determinantes son:

- ❖ Intensidad de Precipitación
- ❖ Textura del Suelo
- ❖ Tipo de arcilla presente
- ❖ Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC)
- ❖ Grado de Acidez del Suelo
- ❖ Cobertura Vegetal Existente

La presencia de altas cantidades de lluvia en suelos de textura arenosa que presenten una baja cobertura vegetal, que posean además arcillas de baja CIC que debiliten y limiten la retención (adsorción) del K en su micela, son factores que favorecen la pérdida del nutrimento en relación directa a la intensidad con que se presenten (**MIELNICZUK, 1982; RITCHEY, 1982**).

La acidez del suelo es una condición que interviene directa y de manera determinante sobre la CIC; por lo general, en suelos ácidos esa condición se reduce a grados que inducen poca retención del elemento, y con ello, una mayor pérdida por lixiviación y percolación en el suelo.

A.2.2 Fijación

La investigación científica ha encontrado y verificado el paso de formas de K intercambiables y de la solución del suelo, a formas no intercambiables por traslado y retención del K en el retículo cristalino de las arcillas 2:1, como la montmorillonita, vermiculita e Illita.

Esa capacidad de fijación de K está determinada por elementos como:

- ❖ Cantidad de K disponible en solución
- ❖ Tipo de arcilla
- ❖ Densidad de carga (-) disponible en el espacio interlaminar
- ❖ pH del medio; valores altos reducen la competencia por posiciones de intercambio.
- ❖ Intensidad del proceso humedecimiento-secado del suelo; el humedecimiento favorece el ingreso del K al retículo donde es posteriormente retenido al secar.

La fijación ocurre con la siguiente secuencia de intensidad entre los tipos de arcillas:

ILITAS > VERMICULITAS > MONTMORILLONITAS

Otros componentes y arcillas del suelo poseen gran afinidad y capacidad para fijar K; como acontece con las Alofanas (material amorfo presente en los suelos de origen volcánico). Se ha determinado una fijación de K casi nula en el caso de las arcillas 1:1 (caolinita), 2:1:1 (clorita) y los compuestos de origen orgánico.

Los procesos de fijación no son estáticos sino que en presencia de condiciones favorables pueden liberar K retenido al medio, como ocurre por ejemplo, con el nuevo humedecimiento e hidratación de la micela de la arcilla.

De acuerdo con **BERTSCH (1995)**, en Costa Rica se ha informado de fijaciones de K en suelos del orden Vertisol, así como también en algunos Andisoles y aún en Ultisoles, aunque expresa, en grados no muy elevados. Agrega que los suelos del país “*por lo general, no presentan problemas de K, sólo los Ultisoles, algunos Vertisoles, los Andisoles de Coto Brus, etc. El K debe representar 2,5 – 5% de saturación de la CICE*”.

A.2.3. Remoción por las Plantas

El K tiene en este particular una especial avidez y selectividad de absorción por parte de las gramíneas, y en especial por la caña de azúcar, la cual reporta cantidades removidas apreciables de este nutrimento, como lo señalaran **CHAVES (1986a, 1996, 1997b)** y **CATANI et al (1959)**.

De acuerdo con esos autores, el K es el nutrimento esencial que como promedio mundial mayores reportes de absorción y extracción mantiene, seguido por el Nitrógeno, Silicio, Calcio, Azufre, Fósforo y Magnesio, en la secuencia que el siguiente modelo presenta:

$$\boxed{\mathbf{K > N = Si > Ca > S > P > Mg}}$$

Como señalara **CHAVES (1996)**, existen en la literatura mundial otros modelos alternativos en los patrones de extracción nutricional, establecidos en la siguiente forma:

K > N > Ca > P - Mg - S
K > N > Ca > Mg > P
K > N > Mg > Ca > P
K > N > Ca > P > Mg
K > N > S > Ca > Mg > P
K > N > S > Mg > P > Ca

Resulta también cierto que existen otros modelos excepcionales donde la relación entre K – N se modifica y reinvierte, como se indica a continuación:

N > K > Ca > Mg > S > P
N > K > Mg > Ca > S > P

El resultado de 54 experimentos de campo e invernadero realizados en varias zonas cañeras del mundo, indican que para producir una tonelada de caña, esa planta extrae en promedio un equivalente aproximado a 1,65 kilogramos de K, con un intervalo (amplitud) entre los valores mínimo de 0,27 kg y máximo de 4,10 kg/TM de tallos, constituyéndose en el nutrimento más removido del suelo por la caña de azúcar.

De acuerdo con esos valores y estimando una productividad promedio de 90 TM de caña/ha, el cultivo estará en capacidad de remover 148,5 kg de K/ha/año, lo cual proyectado a seis cosechas significa un total de 891 kg/ha, a lo que deben agregarse las pérdidas que por causa de los otros procesos descritos ocurren naturalmente en el campo.

A.2.4 Erosión

La pérdida principal por esta vía es provocada por la lluvia, que favorece cuando es elevada y la pendiente lo permite, la escorrentia superficial y la erosión de la capa arable.

En este proceso el K en conjunto con otros nutrimentos es percolado hacia el interior del suelo, o en su caso, arrastrado a zonas por lo general topográficamente más bajas. En condiciones limitantes, este tipo de pérdida puede alcanzar niveles significativos.

A.3 Aportes o Ingresos al Sistema

Podría ubicarse en los medios o formas por los cuales es factible ingresar el K al sistema suelo y restituir las pérdidas del mismo; entre ellos se tienen los siguientes:

- ❖ Aplicación de Fertilizantes.
- ❖ Residuos de Origen Orgánico.
- ❖ Quema de la Planta y los Rastrojos.
- ❖ Reabastecimiento por Fracciones del Suelo.

A.3.1 Aplicación de fertilizantes

Representa uno de los “métodos más tradicionales, difundidos y fáciles para reintegrar la fertilidad de un suelo, o en su caso, corregir el desbalance de un determinado nutrimento”; lo cual sin embargo, sino se ejecuta racionalmente puede resultar oneroso y perjudicial, por la toxicidad o desequilibrio que puede general en el sistema suelo-planta.

Está demostrado por otra parte, que el K que se incorpore al suelo rápidamente es integrado a alguna de las fracciones indicadas: no intercambiable, intercambiable o soluble, lo que conduce de nuevo a su insuficiencia en el suelo (**MALAVOLTA Y USHERWOOD, 1982**).

En el caso particular de la caña de azúcar, el K mantiene una relación de interacción que puede ser sinérgica o antagónica dependiendo de la situación; motivo por el cual, resulta

fundamental optimizar y racionalizar su empleo con respecto a la adición de otros nutrimentos o el encalamiento de los suelos ácidos.

A.3.2 Residuos Orgánicos

La incorporación de materiales de origen orgánico al suelo, favorecen la adición de K entre otros elementos nutritivos. Lo anterior adquiere significancia cuando esos materiales por su origen están proveídos de altas concentraciones de K en sus tejidos, tal como acontece por ejemplo con la cachaza, derivado industrial del proceso de clarificación del azúcar.

La cachaza como indicaran **ANGULO, CHAVES Y GUZMÁN (1996c)**, **ANGULO Y CHAVES (1999b)**, **BERROCAL (1988)**, **CHAVES Y GUZMÁN (1993ab)**, **MALAVOLTA (1976, 1981)**, **MARTIN ORIA *et al* (1987)**, **ORLANDO FILHO (1982, 1983, 1985)** y **SUBIRÓS (1995)**, posee una alta capacidad y potencial nutricional, en virtud de su alto contenido de K y otros nutrimentos esenciales.

A.3.3. Quema

Al igual que se anotara en el caso del N (**CHAVES, 1997b**), la quema de plantaciones de caña constituye una práctica ecológicamente muy negativa e indeseable, aunque importante en las circunstancias actuales de manejo de plantaciones, por motivo de costos de producción y eficiencia de cosecha; se le ha catalogado por ello como “un mal necesario”.

A diferencia de lo que acontece con el N y el S, cuya pérdida por volatilización es elevada; la quema permite y favorece la incorporación de sales de K al suelo, a través de las cenizas, las cuales sin embargo, generan posteriormente serios problemas en el proceso de cristalización y fabricación del azúcar.

Esta vía de restitución del K en el suelo es muy importante, puesto que reintegra mucho del elemento extraído que de otra manera se perdería con la cosecha y traslado de la materia prima a la fábrica, generando con ello una insuficiencia sistemática.

A.3.4. Reabastecimiento por Fracciones del Suelo

En el punto A.1 se comentó suficientemente este aspecto, por medio del cual las diferentes formas en que se encuentra contenido el K en el suelo, reabastecen las fracciones intercambiable y soluble de K, a través del equilibrio dinámico que existe en el medio.

A.4. Contenidos en el Suelo

De acuerdo con **CHAVES (1996)** y **ALPÍZAR (1976)**, los contenidos de K en los suelos cañeros de Costa Rica muestran alguna variabilidad importante, principalmente al relacionarlos con otros nutrimentos también esenciales como se indica en el Cuadro 1.

En principio hay que reconocer que esos contenidos corresponden a promedios aritméticos que enmascaran efectos individuales importantes, razón por la cual cualquier inferencia que se establezca al respecto, debe ser medida y prudente. Es por otra parte también valedero, que la cantidad de observaciones de donde procedieron los promedios es elevada, lo que proporciona confiabilidad a los resultados.

CUADRO 1.
CONTENIDO QUÍMICO APROXIMADO DE MACRONUTRIMENTOS
Y SUS RELACIONES EN LOS SUELOS DE COSTA RICA.

REGIÓN	NÚMERO MUESTRAS	pH	cmol (+) /l			RELACIONES IÓNICAS			
			Ca	Mg	K	Ca/Mg	Ca/K	Mg/K	Ca + Mg/K
GUANACASTE	159	6,36	19,64	6,05	0,52	3,25	37,77	11,63	49,40
ESPARZA	51	5,77	5,91	2,14	0,35	2,76	16,89	6,11	23,00
VALLE CENTRAL	118	5,28	3,88	1,29	0,52	3,01	7,46	2,48	9,94
SAN CARLOS	317	5,44	6,04	2,71	0,83	2,23	7,28	3,26	10,54
TURRIALBA	145	5,07	4,77	1,36	0,21	3,51	22,71	6,48	29,19
PÉREZ ZELEDÓN	104	4,98	1,75	0,96	0,23	1,82	7,61	4,17	11,78
PROMEDIO	894	5,48	7,00	2,42	0,44	2,89	15,91	5,50	21,41

Fuente: CHAVES (1996).

Una interpretación rápida de esos valores demuestra (BERTSCH, 1987) que los contenidos de Calcio (Ca) son suficientes en todas las regiones, excepto en Pérez Zeledón y el Valle Central donde hay deficiencia. En el caso del Magnesio (Mg) acontece lo mismo para el caso de Pérez Zeledón, lo que sugiere posibles respuestas positivas a su adición.

El K muestra por su parte insuficiencia leve en los suelos de Turrialba y Pérez Zeledón, al presentar concentraciones próximas al nivel crítico (0,2 Cmol (+)/l) de referencia; así como contrariamente altos contenidos en San Carlos.

Es sin embargo necesario valorar la relación y proporcionalidad que existe entre el K respecto al Ca y el Mg, principalmente, para disponer de un criterio más amplio e integrador que visualice mejor su condición en el suelo desde una perspectiva nutricional y no apenas química.

La literatura informa sobre efectos interactivos que condicionan la eficiencia y disponibilidad del K respecto a los otros cationes, como lo detallan HUMBERT (1974), ALPÍZAR (1976), CLEMENTS (1980), MALAVOLTA (1976), ORLANDO FILHO Y HAAG (1976), MONTES DE OCA *et al* (1989), ORLANDO FILHO (1978, 1983, 1985), USHERWOOD (1982), DIBB Y THOMPSON (1985), PEIXOTO (1980), HAAG (1965, 1987), CHAVES (1988), MARTIN ORIA *et al* (1987), CENICAÑA (1995), BERTSCH (1987, 1995) y SUBIRÓS (1995).

CHAVES SOLERA (1988) menciona al respecto que *“las relaciones, y no exclusivamente, las concentraciones absolutas de las especies iónicas del suelo influyen marcadamente en el equilibrio dinámico y en la interacción suelo-planta, reflejándose en la absorción, composición mineral y producción de las plantas”*.

La tasa de absorción de iones por parte de la planta, es según ese mismo investigador, directamente influenciada por la concentración de nutrimentos presentes en la solución del suelo, asegurando que el balance catiónico no se restringe apenas a los cationes del complejo de intercambio, sino también, y principalmente, a los cationes disueltos en la solución del suelo que se encuentran en equilibrio dinámico con los cationes intercambiables.

Asevera **CHAVES (1988)**, que por esas razones al evaluar la capacidad potencial de fertilidad de un suelo, deben considerarse además de las cantidades de bases intercambiables y su grado de saturación en el complejo de intercambio, los tipos de coloides, la naturaleza de los iones complementarios adsorbidos y las relaciones existentes entre los iones del suelo. Reitera que a través del estudio iónico, es posible entender mejor el comportamiento químico de un suelo, y por tanto, se puede adoptar el manejo más adecuado de los programas de fertilización.

Es concluyente por tanto, en que en la correcta valoración de un suelo no basta conocer e interpretar apenas las especies y las concentraciones particulares de un determinado nutrimento, sino que se debe ser más amplio y procurar relacionar los balances que entre ellos existan; teniendo la certeza previa como principio básico, de que no hay insuficiencia individual de ninguno de los nutrimentos, pues de nada valdría una interpretación de la interacción si los contenidos son bajos.

PELXOTO (1980) encontró en Brasil, que la mayor producción de materia seca se relacionó con los bajos equilibrios de la relación Mg/K, así como que las altas concentraciones de Mg elevaron la producción, condicionados a que el K estuviera también alto. Concluyó ese investigador, que el K era capaz de reducir los efectos tóxicos provocados por el exceso de Mg en el suelo.

CORDEIRO (1978) por su parte, encontró una buena correlación del K intercambiable con la producción. La relación K/Mg fue negativa para la producción, así como que los altos contenidos de Ca limitaron la disponibilidad del K en el suelo. Encontró además, la existencia de un sinergismo entre el K y el P.

De acuerdo con **BERTSCH (1987)**, la interpretación de las relaciones catiónicas debe establecerse sobre los siguientes valores:

RELACIÓN	CATEGORÍA		
	BAJA < 0 =	MEDIA	ALTA >
Ca / Mg	2	2,1 - 5	5
Ca / K	5	5,1 - 25	25
Mg / K	2,5	2,6 - 15	15
Ca + Mg / K	10	10,1 - 40	40
K	0,2	0,21 - 0,6	0,6

Interpretando los valores del Cuadro 1 de acuerdo con esos índices teóricos, se deduce que en lo concerniente a la relación Ca/K los valores son altos en Guanacaste, lo que demuestra la presencia de un desequilibrio entre ambos nutrientes caracterizada por los altos contenidos de Ca respecto al K, convirtiendo este último en limitante y por tanto necesario adicionar a través de la fertilización.

En Puntarenas (Esparza) parece existir un mejor balance de la relación y por tanto, una menor posible respuesta (o limitada) a su adición al suelo. Como se indicó, en las regiones donde las especies individuales son deficientes la relación pierde sentido práctico, y no justifica por tanto analizarla.

La relación Mg/K se ubica en la categoría de media en todas las regiones, exceptuando en el Valle Central donde es baja por los altos contenidos de K que existen en los suelos.

Por medio de la relación Ca + Mg/K se evidencia con mayor intensidad, la relativa insuficiencia de K en los suelos, al valorarla respecto a esos cationes. En el Valle Central la deficiencia de Ca y el alto contenido de K provocaron un desbalance, que justifica la adición de Ca para corregirlo.

Queda por tanto demostrada la necesidad de elevar el contenido de K en los suelos de Turrialba y Pérez Zeledón, así como la falta de proporcionalidad que existe en Guanacaste (bajo) y el Valle Central (alto), respecto a los contenidos de Ca + Mg.

En lo concerniente a fertilización, el Cuadro 2 resume la expectativa de respuesta y la prioridad de adición nutricional.

**CUADRO 2.
EXPECTATIVA POTENCIAL DE RESPUESTA A LA ADICIÓN DE
NUTRIMENTOS ESENCIALES AL SUELO SEGÚN REGIÓN
PRODUCTORA DE CAÑA DE AZÚCAR EN COSTA RICA.**

REGIÓN	GRADO DE RESPUESTA	
	PREFERENCIAL	CIRCUNSTANCIAL
GUANACASTE	N - P - S - Zn	K
PUNTARENAS	N - P - K - S - Zn	-
VALLE CENTRAL	N - P - Ca - Mg	K
SAN CARLOS	N - P - S	K - Ca
TURRIALBA	N - P - K - S - Zn	Ca - Mg
PÉREZ ZELEDÓN	N - P - K - Ca - Mg - S - Zn	-

FUENTE: CHAVES (1996)

Demuestra el Cuadro 2, que el K es un nutrimento de respuesta mayoritariamente circunstancial en el país, motivo por el cual deben ubicarse las áreas de alta respuesta, pues no todas las regiones y condiciones de cultivo ofrecen respuesta significativa a su adición, lo que permite y obliga a optimizar su empleo.

B. EL POTASIO EN LA PLANTA

Se le considera como el quinto elemento nutricional en importancia para las plantas, luego del Carbono (C), Oxígeno (O), Hidrógeno (H) y Nitrógeno (N), respectivamente. Se relevancia en el metabolismo, fisiología y procesos de producción es indiscutible como lo han indicado **BERINGER (1982)**, **BLEVINS (1985)**, **ALEXANDER (1973)**, **MENGEL (1982)**, **MALAVOLTA (1976, 1980a)**, **STEWART (1969)**, **ZÚÑIGA (1972)**.

B.1 Funciones

Como funciones básicas que desempeña el K en la planta de caña de azúcar se destacan las siguientes:

- ❖ Actúa como activador enzimático de más de 40 enzimas. Regula desde las reacciones de fosforilación hasta la síntesis de proteínas.
- ❖ El ion K es el catión principal en el citoplasma, por lo que mantiene controlado el balance de las cargas aniónicas.
- ❖ Interviene en el control de la turgencia de células especializadas (estomas).
- ❖ Actúa sobre la apertura y cierre de los estomas.
- ❖ Interviene en el metabolismo de los carbohidratos y la formación de almidón.
- ❖ Interviene en la manutención del potencial osmótico de las células.
- ❖ Opera sobre el transporte de carbohidratos: la deficiencia induce disminución de la sacarosa en los tallos y la disminución de la respiración, fotosíntesis y formación de clorofila.
- ❖ Favorece la tolerancia a las heladas, la sequía y la salinidad de los suelos.
- ❖ Promueve la resistencia a enfermedades como *Helminthosporium sacchari*.
- ❖ Reduce el volcamiento y la defoliación de las plantas.

- ❖ Induce un mejoramiento en la calidad de los productos (color, tamaño, acidez, resistencia al transporte, manipulación y almacenamiento, valor nutritivo, cualidades industriales, etc.).
- ❖ Participa en la permeabilidad de las membranas celulares.
- ❖ Actúa sobre el transporte de azúcares a nivel de floema.
- ❖ La deficiencia de K favorece la actividad hidrolítica de la invertasa, generando una mayor cantidad de azúcares reductores.

B.2 Contenidos

De acuerdo con varios autores (**ORLANDO, 1983; CLEMENTS, 1980; MARTIN ORIA et al, 1987; ANDERSON y BOWEN, 1994**), los tejidos de la planta de caña muestran variaciones importantes en las concentraciones de K inducidas por factores como:

- ❖ Variedad cultivada, mostrando las hawaianas especial avidez por el elemento.
- ❖ Sección de la planta muestreada y analizada.
- ❖ Edad del tejido analizado.
- ❖ Orden del suelo donde se encuentra cultivada la planta.
- ❖ Condiciones climatológicas prevalecientes en el lugar (agua, temperatura, radiación solar, luz, etc.).
- ❖ Manejo anterior y actual de la plantación, principalmente en lo concerniente a fertilización (orgánica – inorgánica) y encalado.
- ❖ Ciclo vegetativo de la plantación (planta-soca).
- ❖ Empleo de la quema (tallos y rastrojos).
- ❖ Condición sanitaria del tejido.
- ❖ Contenido de humedad del suelo y el tejido.
- ❖ Presencia de agroquímicos.

El Cuadro 3 presenta algunos resultados de contenidos foliares de K, utilizados por varios países como criterio para establecer el diagnóstico nutricional del elemento.

**CUADRO 3.
CONCENTRACIÓN FOLIAR DE K EN LOS TEJIDOS SEGÚN PAÍS.**

PAÍS O ESTADO	PESO SECO (%) *		HOJA O TEJIDO USADO	EDAD HOJA (MESES)	CORRECCIÓN (kg K/ha)
	CRÍTICO	ÓPTIMO			
BRASIL	0,62	0,62 – 1,45	3	6	99
COSTA RICA	1,00	> 1,50	1	3	165
FLORIDA	0,90	1,00 – 1,60	1**	4-6	154
GUYANA	1,20	-	1	4	-
HAWAI	0,42	0,42 – 0,56	Índice K-H ₂ O***	2-24	0-330
LOUISIANA	1,00	1,25 – 1,75	2	3	74
MAURICIO	0,62	1,05 – 1,45	1	4-6	-
PUERTO RICO	1,00	1,65 – 2,00	1	3	93-279
SUDÁFRICA	1,05	1,05 – 1,29	3	3-9	-
TEXAS	-	1,04 – 1,39	1	4-5	-

Fuente: ANDERSON Y BOWEN (1994).

* Resultados calculados con base a peso seco

** Muestra sin nervadura central

*** Índice K-H₂O = contenido de Potasio en Vainas 1 a 4, expresado con base a peso húmedo.

Se concluye de ese cuadro, que el nivel foliar crítico de K se ubica en el intervalo 0,42 – 1,20% para un promedio aproximado de 0,87%; en tanto que el óptimo se establece en el rango 0,42 – 2,00%.

Es importante señalar y llamar la atención sobre las altas cantidades de K que deben adicionarse al suelo (0 – 330 Kg/ha), para corregir la deficiencia y satisfacer las necesidades y demandas de la planta de caña.

En lo que respecta a extracción de K del suelo, **ORLANDO *et al* (1980)** utilizando la variedad CB 41-76 cultivada en tres suelos cañeros de Brasil, demostró la gran variabilidad existente en función de la edad de la planta, como lo expresa el Cuadro 4.

**CUADRO 4.
CANTIDAD DE K EXTRAÍDA (kg/ha) POR LA SECCIÓN DE “TALLOS + HOJAS”
DE LA VARIEDAD CB 41-76, EN LOS CICLOS PLANTA Y SOCA
EN FUNCIÓN DE LA EDAD (PROMEDIO DE TRES SUELOS DE BRASIL).**

CICLO	EDAD EN MESES						
	4	6	8	10	12	14	16
PLANTA	40,33	62,69	76,46	125,80	183,23	202,81	180,73
SOCA	64,35	133,31	172,92	175,77	192,04	-	-

Fuente: ORLANDO FILHO (1983).

La variedad tal como se indicó, representa otra fuente importante de variación de las concentraciones foliares de K en la caña, como lo demostraran **ORLANDO FILHO y HAAG (1976)** en estudios cuyos resultados se exponen en el Cuadro 5.

CUADRO 5.
CONCENTRACIONES DE K (%) EN LA
HOJA + 3, EN 16 VARIEDADES DE CAÑA DE
AZÚCAR, CICLO PLANTA, EN BRASIL.

VARIEDAD	K (%)	VARIEDAD	K (%)	VARIEDAD	K (%)
CB 49-260	1,52	CB 45-155	1,22	NA 56-62	0,92
CB 56-156	1,45	IAC 51-205	1,05	Co 740	0,90
CB 47-355	1,35	Co 775	1,02	IAC 50-134	0,88
IAC 52-326	1,28	CP 51-22	1,02	IAC 52-150	0,65
CB 61-80	1,24	CB 56-171	0,99		
CB 41-76	1,24	CB 53-98	0,95		

Fuente: ORLANDO FILHO (1983).

En lo que concierne a contenidos de K en la planta, la literatura reporta variaciones significativas según sea la sección de tejido diagnosticada.

Señalan MARTIN ORIA *et al* (1987), que el contenido de K de las distintas partes de las plantas es variable y depende además de la edad. Agregan que el mayor contenido se encuentra en el meristemo, como puede apreciarse en el cuadro 6, cuando es valorado respecto a las vainas 3 a 6. Se nota que los contenidos son altos durante el período de máximo crecimiento, disminuyendo los mismos conforme se avanza hacia la maduración. Aseguran en Cuba, que el incremento verificado a los 8,5 meses en ciclo planta, en los contenidos de K en el meristemo, son debidos al hecho de haber ocurrido la transformación del ápice vegetativo en floral.

Conforme la planta avanza en edad y se acerca a su madurez, los contenidos de humedad en los tejidos se reducen significativamente, lo que induce como consecuencia la disminución de las concentraciones de N y K, como lo señalaran CHAVES Y SALAZAR (1989b) al valorar la Sección 8-10 del tallo en una variedad hawaiana.

CUADRO 6.
VARIACIÓN DEL CONTENIDO DE K CON
LA EDAD Y LA SECCIÓN DEL TEJIDO
EVALUADA, VARIEDAD Ja 60-5 EN CUBA.

EDAD (MESES)	CONTENIDO DE K (%)		
	MERISTEMO	VAINAS 3 A 6	
		ÍNDICE DE K	K - H₂O *
CAÑA PLANTA			
2,7	6,87	1,75	0,27
3,7	6,45	2,04	0,32
4,8	6,16	1,70	0,32
6,2	5,83	1,52	0,37
7,3	4,58	1,22	0,37
8,5	5,23	1,14	0,34
PRIMER RETOÑO			
3,1	6,28	1,39	0,24
5,6	6,25	1,49	0,28
7,9	6,77	1,64	0,44
9,8	5,30	1,26	0,46

Fuente: MARTIN ORIA *et al* (1987).

* Contenido de K en las Vainas 1 a 4, expresado con base a peso húmedo.

B.3 Diagnóstico Foliar

Son numerosos los métodos que pueden emplearse para diagnosticar y evaluar la condición nutricional de una planta. En el caso particular de la caña de azúcar, se atribuye a **CRAIG** y **HALAIS** citados por **ORLANDO FILHO (1983)**, ser los primeros investigadores en emplear en el año 1936 el diagnóstico foliar en la Isla Mauricio.

Este método no se limita como muchos creen apenas al análisis de las hojas (láminas y vainas), sino también a cualquier tejido de la planta inclusive la raíz, por lo que el término correcto sería **DIAGNÓSTICO DE TEJIDOS** o **DIAGNÓSTICO DE PLANTA**.

En lo que concierne propiamente al diagnóstico foliar, la hoja + 1, mejor conocida como **TVD (Top Visible Dewlap)** es la de uso más difundido en el mundo, pese a lo cual también se utiliza con bastante amplitud la Hoja + 3. Actualmente la TVD es la más empleada en el mundo y por tanto la recomendada para el caso particular de Costa Rica.

La TVD o + 1 corresponde a la primera hoja desenrollada que muestra su lígula visible, por lo que es fácil de determinar y ubicar.

De acuerdo con la literatura, la mejor época para realizar el muestreo se encuentra aproximadamente entre los 3 y los 7 meses de edad del tejido (**ORLANDO FILHO, 1983; CENICAÑA, 1995; CLEMENTS, 1980; HAAG, 1965, 1987; MALAVOLTA, 1976; ANDERSON Y BOWEN, 1994**).

ORLANDO FILHO (1983) comenta con amplio conocimiento varios de los criterios que existen para diagnosticar la condición nutricional de la planta de caña, nombrando los más relevantes como sigue:

- **Diagnóstico Foliar (clásico) basado en el nivel crítico del elemento.**
- **Métodos de análisis múltiples:** se realizan durante todo el ciclo vegetativo.
 - **Registros de desarrollo o “crop-logging”.**
 - **Análisis de los internudos 8-10 del tallo (STALK-log).**
- **Análisis selectivos:** Se realiza una o pocas muestras durante el ciclo vegetativo; emplea las hojas + 1, + 3, 4-5-6.
- **Métodos especiales:**
 - **Parcelas diferenciales:** algunas parcelas reciben dosis diferentes de fertilizantes.
 - **Medición de la savia**
 - **de la nervadura central:** este método se ha empleado especialmente para determinar el estado nutricional de la planta con relación al K.
 - **Análisis rápido del tejido:** utiliza las vainas 3, 4, 5 y 6.
 - **Determinación del índice de crecimiento vegetativo.**

- **Sistema Integrado de Diagnóstico y Recomendación (DRIS):** representa actualmente uno de los criterios que mayor aceptación está teniendo en Costa Rica.

Todos los métodos de análisis poseen sus ventajas y desventajas, las cuales vienen referidas a razones de facilidad técnica, costo y tiempo involucrado, factores y variables necesarios medir, grado de exactitud pretendido, capacidad predictiva, número de muestras requeridas, relación de variables permitida, entre muchos otros.

Lo que en esta materia puede asegurarse, es que la variedad constituye el factor que posiblemente introduce el mayor grado de variabilidad en las mediciones, muchas veces más que el mismo suelo, lo que se constituye en un verdadero problema en virtud de la gran cantidad de variedades comerciales (79) que existen cultivadas actualmente en Costa Rica, cuya base comercial se sustenta en 30 clones que ocupan el 96% del área sembrada.

Está por otra parte también suficientemente demostrado, que el experimento de campo continuará siendo el mejor instrumento para conocer la respuesta de una determinada variedad de caña cultivada en una condición particular de suelo, clima y manejo, a la adición en este caso de fertilizantes, lo que no podrá obviarse independientemente del método o criterio de diagnóstico de tejido que se emplee sea este el DRIS o cualquier otro.

Un aspecto hay que tener presente al tomar la muestra vegetal para determinar el contenido de K foliar, como es el hecho de decidir si el mismo se hace con la presencia o ausencia de la vaina o nervadura. Caso se elimine ésta, los valores de K se verán significativamente disminuidos, ya que es precisamente en esa sección donde por su alto contenido hídrico el elemento está presente en mayor concentración.

B.4 Síntomas de Deficiencia

La insuficiencia de K en los tejidos de la planta de caña de azúcar, se manifiesta a través de la presencia de síntomas visuales muy característicos, como son un retraso de severidad variable en el desarrollo general de la caña, que provoca la aglomeración de las hojas apicales cerca de la planta dando la forma de abanico. Los tallos presentan además un adelgazamiento que disminuye su peso y con ello el tonelaje de la materia prima durante la cosecha.

Los márgenes (bordes) y ápices de las hojas presentan una clorosis amarillo-anaranjado, que finaliza con la muerte del área afectada la cual se seca.

Las hojas más viejas que son las más afectadas, muestran pequeños puntos cloróticos que luego se tornan rojizos, llegando a coalescer y dar un aspecto de “quemado” general.

En la base de las hojas más viejas, la epidermis superior de la nervadura central se colorea de rojo ante la insuficiencia de K, lo cual es típico y muy fácil de observar; no debe confundirse este síntoma con la pudrición roja causada por *Colletotrichum falcatum*, la cual además de presentar por lo general olor, atravieza toda la nervadura de la parte superior a la inferior, lo que en el caso del K es apenas superficial.

Numerosos estudios exhiben información gráfica y escrita del efecto inducido por la deficiencia del K en la caña, como lo muestran **ORLANDO FILHO (1983)**, **ANDERSON y BOWEN (1994)**, **SUBIRÓS (1995)**, **ANDREIS (1975)**, **HUBER Y ARNY (1985)**, **MARTIN ORIA *et al* (1987)**, entre otros.

B.5 Absorción y Metabolismo

B.5.1 Absorción

El K es absorbido por la planta a través de las raíces en la forma iónica (K⁺), siendo el proceso esencialmente activo y sirviendo la solución del suelo como fuente de aporte del nutrimento. El mecanismo de absorción se caracteriza por su alta velocidad.

La absorción corresponde al ingreso del nutrimento en forma iónica o molecular en los espacios intercelulares (pared, membrana, citoplasma, vacuólo, mitocondria, cloroplasto, etc.), como anotara **MALAVOLTA (1976, 1980a)**.

El K puede llegar a la superficie de las raíces a través de los mecanismos de absorción: **FLUJO DE MASAS**, **DIFUSIÓN** E **INTERCEPCIÓN** por parte de la raíz. Se considera sin embargo, que la **DIFUSIÓN** constituye el principal mecanismo como lo aseveran **MALAVOLTA y CROCOMO (1982)** y **MALAVOLTA (1976, 1980a)** y se resume en el Cuadro 7 para el caso del maíz.

**CUADRO 7.
CONTRIBUCIÓN DE LOS MECANISMOS DE ABSORCIÓN
RADICULAR EN EL SUMINISTRO DE K AL MAÍZ.**

PRODUCCIÓN ESPERADA (TM/ha)	CANTIDAD NECESARIA DE K	kg/ha SUMINISTRADOS			REFERENC IA
		INTERCEPCIÓ N RADICULAR	FLUJO DE MASA	DIFUSIÓN	
4,5	175	2	20	78	MALAVOLTA Y CROCOMO
9,0	175	4	35	136	MALAVOLTA

Se evidencia en ese cuadro, que la **DIFUSIÓN** representa el mecanismo más eficiente para operar el transporte y la absorción del K en el suelo. Hay que considerar e integrar en este asunto al factor suelo y también al contenido de humedad existente en el mismo, el cual ejerce un papel fundamental.

Se supone y es de esperar que en suelos altamente meteorizados, que posean altos contenidos de arcillas 1:1 (caolinita) donde la fijación de K es baja, la contribución del flujo de masas sea el mecanismo de adsorción más importante.

El **FLUJO DE MASAS** es promovido por la transpiración de la planta, movilizándolo con ello varios minerales entre los que está el K, como lo explica **CHAVES (1997b)**.

B.5.2 Translocación

El ingreso del K al interior de la célula se da en dos etapas o fases (**MALAVOLTA y CROCOMO, 1982**):

- a) **Fase Pasiva**: el ion K llega a los espacios intercelulares y pasa a la pared celular, pudiendo alcanzar la superficie externa del plasmalema, lo que en conjunto define el **ESPACIO LIBRE APARENTE (ELA)**.
- b) **Fase Activa**: el paso a través de la membrana celular es un mecanismo activo que requiere energía, y en el cual se supone está envuelto un “cargador” que combinado y acopiado con el elemento lo transporta al interior del citoplasma.

Se acepta de modo general que la fuente energética utilizada en ese proceso es el **Trifosfato de Adenosina (ATP)**.

De modo general, hay dos caminos que conducen a los elementos del xilema de la planta:

- a) **EL APOPLASTO**: conjunto de espacios intercelulares y paredes celulares, puede llevar el K hasta la endodermis donde el camino se bloquea por la presencia de las **ESTRIAS DE CASPARI** que exhiben baja permeabilidad a los solutos; esta es una fase energéticamente pasiva.
- b) De ahí, la entrada del K a los vasos del xilema solamente puede ocurrir vía **SIMPLASTO**, a través del **CONTINUUN** citoplasmático, constituido por los plasmodesmas; esta fase es energéticamente activa.

El K absorbido por la raíz es conducido a la sección superior de la planta a través del xilema y también por el floema, sistema de vasos que favorece su redistribución interna.

El K es un elemento muy móvil, cuyo destino principal son los tejidos meristemáticos que se encuentran en activo crecimiento, razón por la cual el nutrimento se traslada de los tejidos más viejos a los más nuevos, provocando los síntomas de deficiencia en los primeros donde es más factible.

Una gran mayoría del K (75%) se encuentra en la planta en forma soluble, motivo que induce la presencia de altas concentraciones del elemento en la savia floemática, colocándose como el elemento más abundante en ella (**MALAVOLTA, 1980a**).

De acuerdo con **MARTIN ORIA et al (1987)**, existen evidencias de que el K es el único catión esencial que puede ser transportado en contra de un gradiente de potencial electroquímico.

B.5.3 Absorción Foliar

Al igual que ocurre con otros nutrimentos, el K puede también ser absorbido por la vía foliar, en cuyo caso el elemento atraviesa pasivamente la cutícula generalmente por **DIFUSIÓN** y llega a la pared de las células, donde al igual que acontece en la absorción radicular, requiere de energía (fase activa) para ingresar a la célula.

A partir de los espacios intercelulares el K es conducido al sistema de vasos del xilema y el floema, donde luego es redistribuido a través de la planta.

Se estima que la absorción foliar con K requiere entre 10 y 24 horas para que se absorba al menos el 50% del nutrimento aplicado (**BERTSCH, 1995**).

De acuerdo con la experiencia adquirida a nivel internacional, pretender satisfacer las necesidades de K de la planta de caña de azúcar por la vía foliar resultan pretensiosas y exageradas, en virtud de que estas son muy elevadas; además de que la planta de caña no es una buena absorbidora de nutrientes por esa vía. Por este motivo, las aplicaciones al suelo son las más eficientes y recomendables.

C. RESPUESTA DE LA CAÑA A LAS APLICACIONES

Para desarrollar como corresponde este tópico, resulta necesario indicar previamente varias consideraciones de gran importancia, que permitan ubicar las condiciones necesarias para optimizar y racionalizar el efecto de los fertilizantes sobre la nutrición de la planta.

Debemos reconocer en primera instancia que fertilizar y nutrir una plantación de caña de azúcar, son conceptos diferentes que deben complementarse y optimizarse maximizando sus efectos, lo cual no siempre ocurre; puede fertilizarse pero no nutrirse la plantación.

Cabe preguntarse y responder previamente para poder entender e interpretar correctamente la respuesta de los suelos a la aplicación de K ¿Cuáles son las condiciones de los suelos, donde con mayor frecuencia se notan limitantes y deficiencias de K para las plantas? Al respecto, **BERTSCH (1995)** enumera las siguientes:

- ❑ Suelos viejos y meteorizados como los oxisoles y los ultisoles, caracterizados por poseer una baja CICE.
- ❑ Suelos con texturas arenosas de baja capacidad para retener cationes intercambiables; esta condición se agudiza en zonas con condiciones de alta precipitación.
- ❑ Suelos cuyo origen y material parental es naturalmente bajo en el elemento.
- ❑ Suelos que posean un bajo contenido de arcillas 2:1, expandibles y fijadoras de K, lo que les provee una baja capacidad restitutiva y almacenadora.

- Suelos que pese a tener altos contenidos de arcillas 2:1, la poca concentración de K total hace que su disponibilidad quede aún más reducida por la fijación que sufren.
- Suelos ácidos que presentan abundancia de sesquióxidos de Fe y Al en su complejo de cambio.
- Suelos con presencia de altos contenidos de alofanos fijadoras de K, como acontece con los andisoles o suelos de origen volcánico.
- Suelos con altos contenidos de Ca y Mg que favorecen e inducen el desbalance con respecto al K, como lo revelan las relaciones $\frac{Ca}{K}$, $\frac{Mg}{K}$ y $\frac{Ca + Mg}{K}$.

A lo anterior debe agregarse aquella condición productiva donde no se practica la quema y se cultivan plantas exigentes y muy extractoras de K, como acontece en general con las Gramíneas entre las que se tiene la caña de azúcar.

Hay que recordar en este sentido, que la caña es una planta que como extractora es muy eficiente y efectiva (CHAVES, 1996), por lo que rápidamente agota y deteriora la **fertilidad de los suelos, sobre todo cuando no hay una política de FERTILIZACIÓN RESTITUTIVA**; el estudio realizado por ALPÍZAR QUESADA (1976) es muy revelador en este sentido.

Es por experiencia práctica y producto de la observación empírica, que muchos agricultores tienen por demostrado, la inconveniencia de establecer semilleros de café o hortalizas en campos donde hubo como ellos denominan, un cañal viejo, puesto que es casi seguro que su fertilidad es deficiente, lo que induce problemas al mismo e implica el necesario empleo de dosis elevadas de fertilizante.

A la pregunta del ¿Por qué las gramíneas y entre ellas la caña de azúcar presentan tanta avidez al Potasio?, algunos investigadores han contestado y atribuido el motivo a circunstancias radiculares, propiamente relacionadas a **la CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIONICO (CIC)** de ese sistema.

Acontece que las raíces poseen naturalmente la propiedad de retener e intercambiar cationes (CIC), lo cual está ligado directamente a la especie vegetal, siendo el potencial superior en el caso de las dicotiledóneas respecto a las monocotiledóneas.

Entre mayor sea la CIC, mayor será también la relación entre cationes divalentes (Ca, Mg) y monovalentes (K, Na, Rb) dentro de la planta, siendo relativamente mayor la absorción de cationes divalentes en virtud de su mayor energía de ligación con la raíz (MALAVOLTA Y CROCOMO, 1982; MALAVOLTA, 1982).

Las leguminosas poseen por esa razón, una mayor disposición y eficiencia para adsorber Ca y Mg; en tanto que las gramíneas muestran mayor capacidad para adsorber K en consideración de su menor CIC. Según Ramos citado por MALAVOLTA y CROCOMO (1982), existe una relación inversa entre K absorbido y CIC de las raíces.

En lo que respecta a la fertilización potásica, son muchos los factores que intervienen y determinan su eficiencia, siendo los más relevantes los siguientes: variedad, orden de suelo, época de aplicación, fuente utilizada para su adición, fraccionamiento del fertilizante, interacción con otros nutrimentos, forma de aplicación, condición de humedad prevaleciente en el suelo, ejecución de la quema, entre otros.

Seguidamente se realiza una resumida revisión de resultados nacionales en ese sentido.

C.1 Tipo de Suelo

La diversidad de órdenes (9) de suelo empleados para cultivar caña de azúcar en Costa Rica, han derivado respuestas diferenciales a la adición de K al suelo (**CHAVES Y ALVARADO, 1994; CHAVES, 1996**).

La respuesta a la adición de ese nutrimento ha sido en términos generales positiva, aunque relativamente poco impactante en términos agroproductivos, sobre todo cuando se compara con respecto al efecto promovido por el N y el P como oportunamente se comentó. Los suelos de Costa Rica contienen concentraciones de K que en términos globales se aproximan a las necesidades metabólicas del cultivo, pese a lo cual el K debe siempre incorporarse debido a los elevados requerimientos que la caña de azúcar mantiene o también al desbalance que existe respecto al Ca y el Mg.

De acuerdo con **BERTSCH (1987)**, es poco frecuente encontrar niveles bajos de K en los suelos de Costa Rica, donde sólo un 22% de las muestras analizadas presentan valores menores de 0,2 meq/100 ml, considerado como nivel crítico.

Las provincias donde se siembra caña que más problemas de bajos contenidos de K presentan en sus suelos son Puntarenas y Cartago con un 27% cada una, Alajuela 21%, Heredia 20%, San José 19% y Guanacaste 19%. Entre los cantones que más de la mitad de sus muestras fueron deficientes están: Los Chiles (90%), Hojancha (61%), San Mateo (58%), además de otros que muestran limitantes en menor intensidad como Turrialba (41%), Buenos Aires (45%), Pérez Zeledón (31%), San Ramón (28%), Orotina (36%), San Carlos (29%), Jiménez (30%), Nicoya (25%), Santa Cruz (25%), Esparza (36%).

Las zonas cañeras de altura (> 1000 msnm) donde predominan suelos del orden **ANDISOL** y las variedades hawainas (serie H), muestran alta respuesta al elemento, como lo comprobaran **CHAVES et al (1989acde)**.

Por su parte, **SÁNCHEZ (1983)** determinó con el clon NCo 310 un efecto positivo sobre el tonelaje, al evaluar la interacción de tres dosis de N-P-K- en un suelo vertisol del Ingenio Taboga ubicado en Cañas, Guanacaste; verificó asimismo, un efecto lineal negativo de las dosis de K sobre la calidad de los jugos, atribuible a la acción conjunta que ejerció ese elemento con el N sobre esa variable.

RODRÍGUEZ Y CHACÓN (1993), lograron también obtener respuestas positivas a la interacción N-P-K con el clon Co 421 en un vertisol de Liberia, Guanacaste, luego de

cuatro cosechas. La interacción N-K afectó la pureza de los jugos y la producción de caña y azúcar (TM/ha); el K obtuvo incrementos positivos aunque leves y relativamente poco significativos.

La desproporción del K respecto al N y al P, disminuyó la producción de caña y azúcar en las diferentes interacciones evaluadas.

Otros resultados también reveladores se han logrado en suelos del orden **INCEPTISOL** (AZOFEIFA, 1969; DIECA, 1995; ANGULO *et al*, 1996c; SOLÓRZANO *et al*, 1993), **ANDISOL** (CHAVES *et al*, 1989e; CHAVES Y SALAZAR, 1989c; VEGA, 1985; ROBLES, 1984; CHAVES Y ALVARADO, 1994), **ULTISOL** (CHAVES Y ARREA, 1986; CHAVES *et al*, 1989d; SALAZAR Y VARGAS, 1996b; CHAVES, 1997b; CHAVES 1986b; BARRANTES *et al*, 1991), así como también el interesante diagnóstico efectuado por ALPÍZAR (1976) a nivel nacional.

Los antagonismos entre iones son comunes en el suelo, como ocurre entre Ca, Mg y K, por ejemplo; el antagonismo es definido como la dificultad de adsorción que sufre un nutrimento debido a la presencia de otro en grandes proporciones (BERTSCH, 1987).

En el caso particular de Guanacaste hay que señalar que la mayoría de los suelos de la región poseen altos contenidos de Ca y Mg, en tanto que los de K son medios o bajos, sobre todo en localidades donde los fenómenos de fijación pueden ser altos, como acontece con los Vertisoles o las Alofanas en otras regiones, lo que conduce a desbalances entre sus relaciones iónicas.

Este desequilibrio entre las relaciones Ca/K, Mg/K y $\frac{Ca+Mg}{K}$ inducen una severa disminución de la adsorción de K, el cual por motivos de proporcionalidad y balance se encuentra en reducción, lo que motiva y justifica su aplicación a través de la fertilización, como lo señala BERTSCH (1987).

Sucede que también en muchos suelos donde la concentración de K no es crítica, los altos contenidos de Ca y Mg inducen su insuficiencia con el mismo efecto y necesidad. Es aquí donde aduciendo suficiencia de K en el suelo, muchos técnicos han estimado innecesario e injustificable adicional K, pues ello implicaría un gasto no razonable.

El estudio de la fertilización con K de acuerdo a los órdenes de suelo, ha sido una materia ampliamente investigada y discutida de lo cual existen numerosos estudios clásicos, como acontece con los realizados por ORLANDO FILHO (1976, 1978, 1983, 1985), ORLANDO FILHO Y HAAG (1976), ORLANDO FILHO *et al* (1980), ANDERSON Y BOWEN (1994), CENICAÑA (1995), CLEMENTS (1980), CHAVES *et al* (1984) CHAVES (1983, 1996), CHAVES Y ALVARADO (1994), HAAG (1965, 1987), HUMBERT (1974), MALAVOLTA (1976, 1980a), MARTIN ORIA *et al* (1987) y SUBIRÓS (1995), cada uno de los cuales expone resultados y establece comentarios específicos y generales sobre aspectos muy importantes del K y su interacción con los otros factores que intervienen en la producción de la caña.

Una revisión específica del Cuadro 8, permite ubicar el comportamiento de la caña de azúcar en lo que respecta a la fertilización por orden de suelo, de acuerdo con la categorización existente en ese sentido y que fuera expuesta por **CHAVES (1996)**.

C.2 Variedad

Como en numerosas ocasiones se ha manifestado, la variedad en el caso particular y específico de la caña de azúcar, marca diferencias significativas que muchas veces superan los efectos inducidos por un determinado factor en estudio.

En la zona de Esparza, Puntarenas (200 msnm) se determinó en un inceptisol, que la adición de K en cinco dosis (0-50-100-150-200 kg K₂O/ha) superó en todos los casos al testigo al evaluar dos variedades comerciales: Q 99 y SP 70-1284 en tres cosechas, obteniendo el último clon los mejores índices de producción de caña y azúcar (TM/ha), no así de concentración de sacarosa. Con ambas variedades la más alta productividad de azúcar se alcanzó con la adición de 100 kg de K₂O/ha (**DIECA, 1995**).

Importante es reiterar la elevada avidez y grado de respuesta que mantienen las variedades de origen hawaiano de la sigla (H) hacia el K, en especial la H 50-7209, clon que en su oportunidad fue identificada y señalada como un posible material de uso referencial como testigo experimental para diagnosticar el K (**CHAVES Y ALVARADO, 1994**).

C.3 Fuente Fertilizante

Muy interesante resultaron las conclusiones a que se llegó en la prueba experimental que **CHAVES (1986b)** desarrollaron en la zona de Turrialba con la variedad H 50-7209, la cual mostró como promedio de dos cosechas, una mejor respuesta en producción de azúcar al uso de K₂SO₄ en una dosis de 200 kg de K₂O/ha respecto al KCl. Pese a ello no hubo diferencias estadísticas entre fuentes aunque sí entre dosis (1%).

Comercialmente pese a existir en el mercado nacional varias fuentes de K (**CASTILLO, 1994**), predomina el uso del KCl, seguido por el Sul-PO-MAG o K-MAG, cuyos contenidos nutricionales se indican a continuación:

FUENTE	FÓRMULA	CONTENIDOS PORCENTUALES				
		K ₂ O	N	P ₂ O ₅	MgO	S
CLORURO POTASIO	KCl	60-63	-	-	-	-
SULFATO POTASIO	K₂SO₄	50-53	-	-	-	17,5
NITRATO POTASIO	KNO₃	44	11	-	-	-
SUL-PO-MAG	*	22	-	-	18	22
K-MAG	*	22	-	-	18	22
FOSFATO POTASIO		16-40	0-9	47	-	-

Fuente: **BERTSCH (1995)**.

* K₂SO₄. Mg SO₄. 4H₂O

La adición de K a través de medios líquidos representa otra opción que viene utilizándose más recientemente en el caso de la caña de azúcar con bastante éxito, de lo cual **ROBLES (1994)** comentó sus ventajas.

El amplio desarrollo que viene observando la técnica del riego por goteo actualmente en Costa Rica, debe necesaria y obligadamente complementarse con la fertirrigación, aspecto que aún es incipiente en el país y sobre el cual debe trabajarse mucho pues la opción llegó para quedarse.

C.4 Época de Aplicación

Por su función y funcionalidad en el suelo y la planta, el K mantiene una muy estrecha relación sinérgica con el N, elemento que opera conjuntamente en un claro efecto complementario; se dice que el K es la llave para que el N opere.

Por esta razón, las épocas de aplicación del K están definidas por las del N, las cuales en términos generales se efectúan en forma fraccionada durante los primeros 90 días luego de efectuada la siembra de la caña.

Estudios de fraccionamiento nutricional (N-P-K) efectuados en Cañas, Guanacaste (**ANGULO *et al*, 1996c**) y San Carlos, Alajuela (**SALAZAR Y VARGAS, 1996b**), demostraron respuestas diferentes.

En el caso de Guanacaste (9 msnm), el clon Q 96 mostró luego de cuatro cosechas, mejores productividades de caña y azúcar cuando todo el elemento nutricional se adicionó e incorporó sin fraccionar, al momento de efectuar la siembra conjuntamente con el P.

El estudio efectuado en Cutris de San Carlos (65 msnm) con la variedad PINDAR, indicó luego de efectuadas tres cosechas, que técnicamente el fraccionamiento era la mejor opción, aunque económicamente no resultó ser lo más recomendable (**CHAVES, 1997a**).

Por razones técnicas y de racionalidad nutricional, la aplicación fraccionada tanto del N como del K sigue siendo la práctica más recomendada; son muchos los argumentos que podrían colocarse para justificar favorablemente esta aseveración, a pesar del incremento de costos que implica su ejecución.

Es importante señalar que el encalado de los suelos ácidos conduce por lo general a una mayor pérdida de K por lixiviación, sobre todo al emplearse óxidos. El efecto de competencia del Ca y el K por las posiciones de adsorción e intercambio se aumentan en este caso.

C.5 Forma de Aplicación

Con el objeto de minimizar las posibles pérdidas de K que por causa de la lixiviación puedan ocurrir en el suelo, y complementariamente maximizar el grado de disponibilidad para la planta a través del incremento de su área de exposición; se recomienda su aplicación en la banda de siembra, evitando concentrarlo en un punto en particular.

La aplicación del K puede ser mecánica, lo que ofrece grandes ventajas si se presentan las condiciones idóneas. Por muchos años, en la región de Guanacaste este nutrimento se aplicó por la vía aérea, experiencia que posteriormente se abortó debido a las limitantes que presentaba: pérdidas significativas de fertilizante, distribución heterogénea en el campo y quema foliar de las plantas.

C.6 Dosis

El grado de respuesta a la adición de dosis crecientes de K (K_2O/ha) ha sido muy variada en Costa Rica, determinándose un muy escaso nivel de respuesta con significancia estadística; son relativamente muy pocos los estudios que han mostrado efecto significativo de carácter probabilístico, pues por lo general el incremento productivo ha sido limitado.

En Juan Viñas con el clon H 44-3098 se logró respuesta a una dosis de 200 kg de K_2O/ha (CHAVES *et al*, 1989ce); en Grecia utilizando la B 59-233 fue apenas de 60 kg/ha (ALPÍZAR, 1983; ALPÍZAR *et al*, 1984); en Esparza con los clones Q 96 y SP 70-1284 el mayor incremento ocurrió con 100 kg de K_2O/ha , todo lo cual demuestra la amplia variabilidad que en esta materia existe.

En el Cuadro 8 adjunto se presenta un detalle por región y ciclo vegetativo, de los rangos de respuesta observados en lo que respecta a la fertilización potásica en Costa Rica, los cuales son el producto de la investigación y la experiencia pragmática obtenida en muchas localidades del país (CHAVES, 1996).

CUADRO 8.
ÁMBITO DE RESPUESTA DE LA CAÑA DE AZÚCAR,
A LA APLICACIÓN DE K AL SUELO SEGÚN
REGIÓN Y CICLO VEGETATIVO EN COSTA RICA.

REGIÓN	kg K_2O/ha	
	PLANTA	SOCA
GUANACASTE Y PUNTARENAS *	80-100	80-140
VALLE CENTRAL OCCIDENTAL	120-160	150-200
SAN CARLOS	130-180	130-160
TURRIALBA	120-160	150-200
PÉREZ ZELEDÓN	130-180	150-180
REGIONES ALTAS **	160-200	160-250
AMPLITUD (MAX-MIN)	80-200	80-250

Fuente: CHAVES (1996).

* Principalmente en suelos del orden Vertisol.

** Mayores de 1.000 msnm.

C.7 Eficiencia

La eficiencia de aplicación y absorción del K va muy relacionada y en función casi directa con la capacidad de evitar y eliminar los factores que inducen pérdidas en el suelo, como son básicamente los provocados por la lixiviación y la fijación.

La **LIXIVIACIÓN** ocurre cuando el K se:

- ❑ Aplica en suelos de texturas arenosas.
- ❑ Utiliza en zonas que poseen niveles de precipitación altos, frecuentes y continuos.
- ❑ La acidez es elevada y la CICE baja.
- ❑ Incorpora en suelos cuyo nivel freático es bajo y el drenaje está favorecido.
- ❑ Adiciona en dosis elevadas o el estado vegetativo del cultivo no es el adecuado.
- ❑ Aplican fertilizantes nitrogenados amoniacales que compiten fuertemente con el K por las posiciones de fijación.
- ❑ Incorpora en una forma inconveniente (localizado) favoreciendo las pérdidas.

La **FIJACIÓN** del K se presenta a su vez en:

- ❑ Suelos con altos contenidos de arcillas 2:1.
- ❑ Condiciones de humedecimiento – secado como las presentes en regímenes de humedad **ÚSTICOS**.

Según **BERTSCH (1995)**, la eficiencia de la **FERTILIZACIÓN POTÁSICA** puede estimarse entre un 60 y un 80%, rango de disponibilidad muy superior respecto al N (50-70%) y el fósforo (30-50%).

C.8 Aplicación de Vinazas

La vinaza como derivado principal de la elaboración del alcohol, constituye un subproducto que presenta varias ventajas y desventajas según sea la perspectiva desde la cual se le analice.

Los grandes volúmenes generados, el elevado grado poluente y contaminante (posee un DBO de 45.000 a 50.000 mg/kg) que las vinazas poseen, constituyen serias limitantes para su empleo y correcta manipulación en el campo.

Hay que destacar según la experiencia costarricense, que se requieren de 3,7 a 3,8 kg y hasta 4,1 kg de melaza para producir un litro de alcohol; o en su caso, por cada tonelada métrica de caña se generan aproximadamente 64 a 68 lt de alcohol. El problema surge a partir del hecho de que por cada litro de alcohol destilado se producen aproximadamente de 12 a 16 lt de vinaza, relación que como se indicó, genera un volumen muy elevado de esa sustancia en un período de tiempo muy corto que dificulta su manejo.

En este asunto como es lógico suponer, el grado de pureza de la melaza o del jugo de la caña, y el contenido de azúcares fermentables es básico en la eficiencia de destilación y volumen de vinaza generada en el proceso. En Costa Rica la gran mayoría del alcohol es obtenido a partir de la miel final.

Con un alto sentido pragmático y procurando alcanzar beneficios tangibles de ese derivado en materia productiva y también de salud pública (Valor Agregado), el sector azucarero costarricense ha implementando medidas y realizado estudios que procuran optimizar y racionalizar el uso de las vinazas en el campo a través de la **FERTIRRIGACIÓN**.

La vinaza posee como elemento favorable altos contenidos de K y Ca, así como materia orgánica coloidal que es la que promueve su alta **DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO (DBO)**; otros minerales como el hierro también destacan entre sus contenidos naturales.

Según sea la procedencia y las características del material (miel-jugo) a partir de donde se obtendrá la vinaza por destilación, así será la concentración de K que se obtendrá.

SUBIRÓS (1995) indica, que en Costa Rica el contenido de K obtenido a partir de la melaza (0,70%), casi duplica el procedente a partir del jugo de la caña (0,32%).

ORLANDO FILHO (1983) informa que los contenidos de K variaron según fuera la fuente de vinaza originaria, los cuales al ser convertidos a un equivalente en KCl indicaron lo siguiente:

Mosto de Melaza	9,22 kg de KCl/m³
Mosto de Jugo	4,47 kg de KCl/m³
Mosto Mixto	2,55 kg de KCl/m³

En Costa Rica el equivalente de K₂O/m³ de vinaza obtenido, es de aproximadamente 3,2 kg/ha cuando ésta procede del jugo de la caña y de 7,0 kg cuando la fuente es la melaza, lo cual sin embargo es muy variable.

La experiencia adquirida en el país por el sector azucarero ha sido importante en esta materia, determinándose una respuesta próxima y ubicada en el rango de 100 a 150 m³ de vinazas/ha; como lo han indicado los estudios realizados por **BERROCAL (1988)**, **ALFARO (1996)**, **ALFARO Y ALFARO (1996)**, **SUBIRÓS Y MOLINA (1992)**, **ODIO (1985)**, **SUBIRÓS (1987)**, **CHAVES (1985)**, **ORLANDO FILHO (1982, 1983, 1985)** y **SALAS (1998)**, entre otros.

D. EFECTO SOBRE LA CALIDAD

Numerosa es la literatura que informa sobre los efectos benéficos del K sobre las variables que determinan la calidad de los cultivos y en especial de la caña de azúcar, como lo refieren **ALEXANDER (1973)**, **ORLANDO FILHO (1982, 1983, 1985)**, **MARTIN ORIA *et al* (1987)**, **MALAVOLTA (1976, 1982ab)**, **CENICAÑA (1995)**, **HUMBERT (1974)**, **CHAVES *et al* (1991)**, **CLEMENTS (1980)**, **ARIAS (1959)**, **SUBIRÓS (1995)**, **SUZUKI (1982)**, **PRETTY (1982)**, **SANTOS (1983)** y **BASSO (1974)**.

Muchos correlacionan y asocian la deficiencia de K con los bajos índices de productividad agroindustrial expresada ésta en una menor cantidad de caña y azúcar en el campo, al reducirse significativamente las concentraciones de sacarosa en los tallos.

Se ha encontrado que las dosis elevadas de K aplicadas en el campo, influyen negativamente sobre los contenidos de sacarosa del jugo, promoviendo a su vez incrementos lineales en los contenidos de cenizas que disminuyen el pol % en caña (correlación lineal inversa).

El aumento del contenido de cenizas en el jugo ocasiona afección de la calidad del azúcar, lo que es fuertemente influenciado por el K, al representar éste su principal constituyente.

Las cenizas se constituyen en puntos de formación de cristales durante la cristalización del azúcar en el proceso fabril, los cuales sin embargo, inducen la formación de azúcar de baja calidad que no cumple con las normas de calidad establecidas al respecto (color, tamaño y forma del cristal).

El problema se presenta también en el hecho de que los altos contenidos de cenizas dificultan el agotamiento de las mieles, además de que promueven la formación de las mismas, motivo por el cual se considera al K como un compuesto **MELASIGÉNICO**, donde un átomo de K retiene otro de sacarosa con las consecuencias negativas que ello implica para el sector azucarero (no alcoholero).

Se ha asociado y correlacionado positivamente el contenido de cenizas con el de almidón en las variedades de caña de azúcar, carbohidrato este que dificulta a su vez la filtrabilidad del azúcar.

La vinaza en virtud de sus altos contenidos de K, no ha escapado a esta consideración, pues la aplicación de volúmenes elevados en el campo ha reducido sensiblemente el pol% en caña.

Algunos investigadores señalan que plantas de caña deficientes en K, acumulan la sacarosa en las vainas al no favorecerse su distribución al resto de la planta. Se indica además, que los mayores niveles de azúcares reductores son detectados cuando no se fertiliza con K (**MARTIN ORIAS *et al*, 1987**).

Asegura **SANTOS VIEIRA (1983)** al respecto, que el K afecta directa o indirectamente muchas, sino todas, las funciones bioquímicas y fisiológicas de la planta, siendo considerado el factor que más contribuye para el logro de un mejor crecimiento y una mayor producción de la caña de azúcar.

En un estudio de laboratorio, esa investigadora procuró determinar la influencia del ion K sobre la actividad enzimática que regula la biosíntesis de los azúcares en la caña. En este sentido se tiene suficientemente verificado, que la ausencia de cantidades significativas de sacarosa está asociada con la presencia de altas concentraciones de azúcares reductores, los que a su vez correlacionan con la existencia de elevados niveles de **INVERTASA ÁCIDA** soluble, la cual es muy activa en los tejidos de la caña durante la fase de desarrollo vegetativo.

Los resultados revelaron que el K efectivamente influencia de manera diferencial según sea la dosis, el desarrollo inicial de la planta; a mayor K mayor tasa de crecimiento. Determinó una correlación inversa entre el contenido de sacarosa y los niveles de azúcares reductores; hubo una eficiente inversión de sacarosa por parte de la enzima invertasa principalmente en condiciones de deficiencia de K.

No observó por otra parte, efectos directos del K en la actividad de la invertasa ácida y la invertasa neutra, a pesar de haber bajas concentraciones del elemento en el medio, lo que más bien promovió una actividad elevada. Concluyó que la edad fisiológica de la planta ejerció una influencia más decisiva que las dosis de K evaluadas, sobre la actividad de la enzima. La actividad de la invertasa ácida siempre fue mayor que la neutra.

Quedó evidenciado asimismo, la estrecha correlación existente entre la inversión de sacarosa y la actividad de la invertasa ácida, pues ésta siempre se asoció en la hoja con los bajos niveles de sacarosa.

Procurando avances en la misma línea, **SUZUKI (1982)**, estudió la relación del K con las invertasas y la capacidad de acúmulo de sacarosa por parte de la caña. Encontró que bajas concentraciones de K en la solución, indujeron una reducción drástica en el crecimiento de la planta, y la manifestación de deficiencias severas del elemento.

Determinó igualmente, un bloqueo de la biosíntesis proteica en el metabolismo del N, y una mayor actividad de las enzimas invertasa ácida y neutra en las hojas principalmente, para atender el metabolismo enérgico de los carbohidratos, cuando había deficiencia de K.

Concluyó que el acúmulo de sacarosa en los entrenudos se acompañó por un aumento de la invertasa alcalina en las vainas y una disminución de la invertasa ácida, lo que sugiere la existencia de una interacción entre la actividad enzimática de la vaina foliar y los eventos bioquímicos que ocurren en el tallo en desarrollo, todo lo cual contó con la participación directa del K.

Al igual que acontece en el suelo, en el interior de la planta ocurre un efecto interactivo de los nutrimentos, entre los cuales la relación K/N es fundamental, como verificara

SILVEIRA (1980), quien concluyó la interferencia del K sobre la concentración y migración de los azúcares de las hojas al tallo.

En su estudio determinó que la adición de dosis crecientes de K provocaron aumentos en la concentración y producción de sacarosa y azúcares reductores totales, disminución en la concentración de azúcares reductores y aumento en la migración de azúcares de las hojas al tallo.

Como se anotó inicialmente, es mucha la evidencia práctica que sobre efectos del K en la calidad agroindustrial existen, algunos de los cuales son favorables y otros negativos, lo cierto es que su adición como nutriente es esencial, como su misma categorización nutricional lo señala.

CONCLUSIÓN

Queda suficientemente demostrada luego de desarrollar el tópico, la importancia y trascendencia que el K posee sobre la calidad agroindustrial de la caña de azúcar.

Cualquier argumentación que pretenda obviar o minimizar su necesidad resulta débil y poco juiciosa, a la luz de la enorme evidencia que sobre el nutrimento existe a nivel tanto nacional como internacional. Debe en este sentido entonces quedar claro, que el efecto del K en la caña puede inducir consecuencias tanto positivas como negativas, motivo por el cual su empleo debe ser racional y apegado a principios y normativas fundamentadas en criterios técnicos.

Como se indicó en el texto, no es de esperar con la adición de K, el incremento vertiginoso e impresionante de los índices de productividad agroindustrial, puesto que la función y funcionabilidad del nutrimento en la planta exhibe un patrón de comportamiento muy diferente al del resto de nutrientes, lo cual inviabiliza respuestas de esa naturaleza.

Vasta recordar que el K no forma parte de tejido o estructura alguna en la planta, sino que su participación es más de carácter promotor y regulatorio, por lo que su acción sinérgica sobre otros elementos, sobretodo el Nitrógeno, es de vital importancia para lograr un metabolismo equilibrado y ajustado a las necesidades de la planta y exigencias del cultivo.

Debe asimismo quedar claro, que la no aplicación del K en algunas unidades productivas de Costa Rica, principalmente de la región de Guanacaste, no responde ni tiene por fundamento bases científicas, sino que es el producto de criterios la mayoría de las veces personales, que posiblemente con el transcurrir del tiempo serán superados por el peso de la realidad experimental y comercial que viene adquiriéndose.

La caña de azúcar es una planta que por su elevado contenido hídrico y de acciones y regulaciones osmóticas, requiere del K como elemento compensatorio, motivo suficiente que justifica su utilización comercial independientemente de otras consideraciones; el metabolismo y fisiología de la planta de caña requieren de la necesaria acción del K.

Las aseveraciones anteriores pretenden responder a esa “sorpresa” que algunos técnicos y profesionales ajenos o de reciente participación en el sector azucarero han mostrado, ante el no empleo del K por parte de algunas empresas de alto nivel tecnológico en el país, lo que como se indicó, no es congruente ni compatible con la experiencia y resultados verificados en el campo por parte de agroindustria azucarera nacional.

El K debe ser visualizado y conceptualizado desde una óptica diferente, más holística e integradora, que atomística puntual, aunque siempre teniendo en consideración su misma calificación nutricional de elemento esencial (**CHAVES, 1989**), lo que requiere de nuevos enfoques analíticos e investigativos (**CHAVES, 1998ab**).

LITERATURA CITADA

- ACOSTA J., R. 1994. Una Revisión de la Tecnología y Uso de Fertilizantes en la Agricultura. In: Curso: Fabricación y Uso de Fertilizantes. San José, Costa Rica. Cámara Insumos Agropecuarios, MAG, Setiembre. p: 1-7.
- ALEXANDER, AG. 1973. Sugarcane Physiology. A Comprehensive Study of the Saccharum Source – to Sink System. Amsterdam, Elsevier. Publ. Co. 752 p.
- ALFARO P., R. 1988. Evaluación de la Interacción de Tres Niveles de Fósforo y CaCO₃ en el Cultivo de la Caña de Azúcar en San Ramón, Alajuela. In: Congreso Lic. Manuel Jiménez de la Guardia, 6, San José, Costa Rica, 1988. Memorias. San José, Asociación de Técnicos Azucareros de Costa Rica (ATACORI). p: 32-33.
- ALFARO P., R. 1996. Evaluación de la Vinaza como Fertilizante Potásico sobre los Rendimientos Agroindustriales de la Caña de Azúcar y su efecto sobre las Características Químicas de un Suelo Inceptisol de la Región del Valle Central, Costa Rica. San José, Costa Rica, DIECA, setiembre. 34 p.
- ALFARO, R.; ALFARO, J.A. 1996. Evaluación de la vinaza como fertilizante potásico en la caña de azúcar y su efecto sobre las propiedades químicas de un suelo de Atenas, Alajuela. In: Congreso nacional Agronómico y de Recursos Naturales, 10, San José, Costa Rica. 1996. Memoria: Suelos. San José, Colegio de Ingenieros Agrónomos: EUNED, EUNA. Volumen 3. p: 175.
- ALFARO, R.; VILLALOBOS, C. 1996. Efecto de Diferentes Abonos Orgánicos Sobre los Rendimientos Agroindustriales de la Caña de Azúcar en la Región del Valle Central. In: Congreso Nacional Agronómico y de Recursos Naturales, 10, San José, Costa Rica, 1996. Memoria: Suelos. San José, Colegio de Ingenieros Agrónomos, Asociación Costarricense de Fitopatología y Asociación Costarricense de Suelos: EUNED, EUNA. Volumen 3. p: 172.
- ALFARO, R. 1999. Evaluación de la Vinaza como Fertilizante Potásico en la Caña de Azúcar y su Efecto sobre las Propiedades Químicas de un Inceptisol de Atenas, Alajuela. In: Congreso Nacional Agronómico y de Recursos Naturales, 11, San José, Costa Rica, 1999. Memoria: Recursos Naturales y Producción Animal. San José, Colegio de Ingenieros Agrónomos: EUNED. Volúmen 3. p: 77.
- ALPÍZAR MONGE, D. 1983. Respuesta de la Caña de Azúcar (*Saccharum officinarum*) a Dosis de Potasio en un Suelo (**Oxic dystrandep**) en Grecia de Alajuela. Tesis Ing.Agr. San José, Universidad de Costa Rica, Facultad de Agronomía. 126 p.
- ALPÍZAR MONGE, D.; LOPEZ, C. A.; CHAVES SOLERA, M. A. 1984. Respuesta de la Caña de Azúcar (*Saccharum officinarum*) a Dosis de Potasio en un Oxic dystrandep en Grecia de Alajuela. In: Congreso Agronómico Nacional, 6, San José, Costa Rica, 1984. Resúmenes. San José, Colegio de Ingenieros Agrónomos, Julio. Volumen 1. p: 53-54.
- ALPÍZAR QUESADA, R. 1976. Fertilidad de Suelos Cañeros Costarricenses. Tesis Ing.Agr. San José, Universidad de Costa Rica, Facultad de Agronomía. 120 p.
- ALVARADO, A. 1984. Aluminio Activo en Suelos Derivados de Cenizas Volcánicas de Costa Rica y Guatemala. Turrialba (Costa Rica) 34: 396 - 398.

- ANDERSON, D.L.; BOWEN, J.E. 1994. Nutrición de la Caña de Azúcar. Quito, Ecuador. Instituto de la Potasa y el Fósforo (INPOFOS). 40 p. ANDERSON, D. 1995. La Caña de Azúcar y el Fósforo. *Informaciones Agronómicas* 18:6. Enero.
- ANDERSON, D.L. 1997a. El Nitrógeno (N) y la Caña de Azúcar. *Sugar Journal*, April. p: 8,9.
- ANDERSON, D.L. 1997b. La Deficiencia de Nitrógeno (N) y el Análisis Foliar (Serie Nitrógeno N° 2). *Sugar Journal*, May. p: 10, 11.
- ANDERSON, D.L. 1997c. Requerimientos de Nitrógeno (N) y la Planta de Caña de Azúcar (Serie Nitrógeno N° 3). *Sugar Journal*, June. p: 6, 7.
- ANDREIS, H.J. 1975. Macro and Micro Nutrient Content of Millable Florida Sugar Cane. *Sugar Journal*. New Orleans, 37(8): 10-12.
- ÂNGULO, A.; CHAVES M.; GUZMÁN, G. 1996a. Efecto de Cinco Dosis Crecientes de Nitrógeno Sobre los Rendimientos Agroindustriales de Tres Variedades Comerciales de Caña de Azúcar, Promedio de Cuatro Cosechas, en un Inceptisol de Cañas, Guanacaste. In: Congreso Nacional Agronómico y de Recursos Naturales, 10, San José, Costa Rica, 1996. Memoria: Suelos. San José, Colegio de Ingenieros Agrónomos, Asociación Costarricense de Fitopatología y Asociación Costarricense de Suelos: EUNED, EUNA. Volumen 3. p: 153.
- ANGULO, A.; CHAVES, M.; GUZMAN, G. 1996b. Evaluación del Efecto de Tres Fuentes y Dos Dosis de Fósforo Sobre los Rendimientos Agroindustriales de la Caña de Azúcar, Promedio de Cuatro Cosechas, en un Inceptisol de Cañas, Guanacaste. In: Congreso Nacional Agronómico y de Recursos Naturales, 10, San José, Costa Rica, 1996. Memoria: Suelos. San José, Colegio de Ingenieros Agrónomos, Asociación Costarricense de Fitopatología y Asociación Costarricense de Suelos: EUNED, EUNA. Volúmen 3. p: 155.
- ANGULO, A.; CHAVES, M.; GUZMÁN, G. 1996c. Efecto del Fraccionamiento de los Macronutrientes (N-P-K) Sobre los Rendimientos Agroindustriales de la Caña de Azúcar, Promedio de Cuatro Cosechas, en un Inceptisol de Cañas, Guanacaste. In: Congreso Nacional Agronómico y de Recursos Naturales, 10, San José, Costa Rica, 1996. Memoria: Suelos. San José, Colegio de Ingenieros Agrónomos, Asociación Costarricense de Fitopatología y Asociación Costarricense de Suelos: EUNED, EUNA. Volumen 3. p: 156.
- ANGULO, A.; CHAVES, M.; GUZMÁN, G. 1996d. Efecto de la Forma de Colocación de Tres Fuentes de Fertilizante Nitrogenado Sobre los Rendimientos Agroindustriales de la Caña de Azúcar, Promedio de Cuatro Cosechas, en un Inceptisol de Cañas, Guanacaste. In: Congreso Nacional Agronómico y de Recursos Naturales, 10, San José, Costa Rica, 1996. Memoria: Suelos. San José, Colegio de Ingenieros Agrónomos, Asociación Costarricense de Fitopatología y Asociación Costarricense de Suelos: EUNED, EUNA. Volumen 3. p: 154.
- ANGULO, A.; CHAVES, M. 1999a. Interacción de la Fertilización Orgánica/Inorgánica Sobre los Rendimientos Agroindustriales de la Caña de Azúcar. Promedio de Cuatro Cosechas. Cañas, Guanacaste. In: Congreso Nacional Agronómico y de Recursos Naturales, 11, San José, Costa Rica, 1999. Memoria: Recursos Naturales y Producción Animal. San José, Colegio de Ingenieros Agrónomos: EUNED. Volúmen 3. p: 75.
- ANGULO, A.; CHAVES, M. 1999b. Efecto de Nueve Dosis de Cachaza Sobre los Rendimientos Agroindustriales de la Caña de Azúcar. Promedio de Cuatro Cosechas. Cañas, Guanacaste. In: Congreso Nacional Agronómico y de Recursos Naturales, 11, San José, Costa Rica, 1999. Memoria: Recursos Naturales y Producción Animal. San José, Colegio de Ingenieros Agrónomos: EUNED. Volúmen 3. p: 74.

- ARIAS VENEGAS, E. 1959. Estudio sobre los Efectos de N-P-K en la Elaboración de Dulce. Tesis Ing.Agr. San José, Universidad de Costa Rica, Facultad de Agronomía. 42 p.
- AZOFEIFA GONZÁLEZ, C.A. 1969. Respuesta al Potasio por la Caña de Azúcar en La Guácima, Alajuela. Tesis Ing.Agr. San José, Universidad de Costa Rica, Facultad de Agronomía. 42 p.
- BAHIA FILHO, AFC; BRAGA, J.M. 1975. Fósforo em Latossolos do Estado de Minas Gerais. III. Indices de Disponibilidade de Fósforo e Crescimento Vegetal. *Experimentiae* 20: 217-234.
- BARQUERO M., E.; VARGAS M., N. 1988. Efecto de la Interacción de 3 Niveles de Fósforo y 3 Densidades de Semilla en la Productividad de la Caña de Azúcar. In: Congreso Lic. Manuel Jiménez de la Guardia, 6, San José, Costa Rica, 1988. Memorias. San José, Asociación de Técnicos Azucareros de Costa Rica (ATACORI) p: 63-70.
- BARQUERO MADRIGAL, E. 1989. Respuesta de la Caña de Azúcar (*Saccharum officinarum*) cv "Pindar" al Encalado y a la Fertilización Fosfórica en Arenal de San Carlos. Tesis Ing.Agr. San José, Universidad de Costa Rica, Facultad de Agronomía. 145 p.
- BARRANTES, J.C.; CHINCHILLA, A.; MESEN, R. 1991. Efecto del Nitrógeno, Potasio y sus Interacciones sobre el Rendimiento Agroindustrial de la Caña de Azúcar (**Saccharum spp**) en un Suelo de Pérez Zeledón, Costa Rica. In: Congreso de Tecnología Azucarera de Centroamérica, 9, San José, Costa Rica, 1991. Resúmenes. San José, Asociación de Técnicos Azucareros de Centroamérica (ATACA) p: 9.
- BARRANTES, J.C.; CHAVES, M. 1999a. Estudio de Cuatro Fuentes de Fósforo sobre la Productividad Agroindustrial de las Variedades SP 71-5574 y Mex 68-p-23 en un Ultisol de Pérez Zeledón. Promedio de Dos Cosechas. In: Congreso Nacional Agronómico y de Recursos Naturales, 11, San José, Costa Rica, 1999. Memoria: Recursos Naturales y Producción Animal. San José, Colegio de Ingenieros Agrónomos: EUNED. Volúmen 3. p: 344.
- BARRANTES, JC; CHAVES, M. 1999b. Evaluación de Seis Dosis de Fósforo Sobre los Rendimientos Agroindustriales de la Variedad de Caña de Azúcar SP 71-5574 en un Ultisol de Pérez Zeledón. Promedio de Tres Cosechas. In: Congreso Nacional Agronómico y de Recursos Naturales, 11, San José, Costa Rica, 1999. Memoria: Recursos Naturales y Producción Animal. San José, Colegio de Ingenieros Agrónomos: EUNED. Volúmen 3. p: 343.
- BARRANTES, J.C.; CHAVES, M. 1999c. Efecto Interactivo de 3 dosis de Carbonato de Calcio y 4 de Fósforo, Sobre la Producción Agroindustrial de la Caña de Azúcar, Promedio de 3 Cosechas, en un Ultisol de Pérez Zeledón. In: Congreso Nacional Agronómico y de Recursos Naturales, 11, San José, Costa Rica, 1999. Memoria: Recursos Naturales y Producción Animal. San José, Colegio de Ingenieros Agrónomos: EUNED. Volúmen 3. p: 354.
- BASSO, LC. 1974. Formação de Di-e Poliaminas em Plantas Deficientes em Potássio e Magnésio. Tese M.Sc. Piracicaba, ESALQ/USP. 40 p.
- BEATON, J.D.E.; ESPINOSA, J. 1996. Fertigation and the use of liquid fertilizers. In: Congreso Nacional Agronómico y de Recursos Naturales, 10, San José, Costa Rica. 1996. Memorias: Suelos. San José, Colegio de Ingenieros Agrónomos: EUNED, EUNA. Volumen 3. p: 129-134.
- BERINGER, H. 1982. O Potássio na Produção Das Culturas. In: Simpósio sobre Potássio na Agricultura Brasileira. Londrina, Brasil, 1982. Anais. Piracicaba: Instituto da Potassa & Fosfato; Instituto Internacional da Potassa; Fundação IAPAR. p: 163-175.

- BERROCAL, M. 1988. Efecto de los Residuos de la Industria Azúcar - Alcoholera, Bagazo, Cachaza y Vinaza, en la Producción de Caña y Azúcar en un Vertisol de Guanacaste. *Agronomía Costarricense (Costa Rica)* 12(2): 147-153.
- BERTSCH H., F. 1987. Manual para Interpretar la Fertilidad de los Suelos de Costa Rica. 2ª ed. San José, Costa Rica: Oficina de Publicaciones de la Universidad de Costa Rica. 81 p.
- BERTSCH, F. 1995. La Fertilidad de los Suelos y su Manejo. San José, Costa Rica: Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo. 157 p.
- BESOAIN, E. 1985. Mineralogía de Arcillas de Suelos. San José, Costa Rica: IICA/Serie de Libros y Materiales Educativos N° 60. p: 533-736.
- BLEVINS, DG. 1985. Role of Potassium in Protein Metabolism in Plants. In: Symposium International of Potassium in Agriculture. Atlanta, Georgia, EUA, 1985. Proceeding. Wisconsin-USA. American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America. p: 413-424.
- BOCKMAN, O.C.; KAARSTAD, O.; LIE, ØH; RICHARDS, I. 1993. Agricultura y Fertilizantes. Oslo, Noruega, HYDRO AGRI, Norsk Hydro a. s. 265 p.
- BODDEY, R.M.; URQUIAGA S., S.; DOBEREINER, J. 1995. Biological Nitrogen Fixation Associated with Sugarcane. Sugarcane, June. p: 34-35.
- CALDERON, G. 1999a. Efecto de la Interacción de Dosis Crecientes de Carbonato de Calcio y Fósforo, Sobre los Rendimientos Agroindustriales de la Caña, Promedio de Cuatro Cosechas, en un Ultisol de Turrialba. In: Congreso Nacional Agronómico y de Recursos Naturales, 11, San José, Costa Rica, 1999. Memoria: Recursos Naturales y Producción Animal. San José, Colegio de Ingenieros Agrónomos: EUNED. Volúmen 3. p: 355.
- CALDERON, G. 1999b. Verificación del Efecto de la Interacción del Carbonato de Calcio y el Fósforo Sobre los Rendimientos Agroindustriales de la Caña, Variedad Q96, en Tucurrique de Jiménez. Promedio de dos Cosechas. In: Congreso Nacional Agronómico y de Recursos Naturales, 11, San José, Costa Rica, 1999. Memoria: Recursos Naturales y Producción Animal. San José, Colegio de Ingenieros Agrónomos: EUNED. Volúmen 3. p: 356.
- CANESSA, J.; SANCHO, F.; ALVARADO, A. 1986. Retención de Fosfatos en Andepts de Costa Rica. I. Relaciones entre la Retención de Fosfatos, el pH en NaF y el Al Activo. *Turrialba (Costa Rica)* 36(4): 431-438.
- CASTILLO VILLALOBOS, E. 1994. Procesos de Fabricación de Formulaciones Químicas. In: Curso: Fabricación y Uso de Fertilizantes. San José, Costa Rica. Cámara Insumos Agropecuarios, MAG, Setiembre. p: 8-17.
- CATANI, RA.; ARRUDA, HC.; PELLEGRINO, D.; BERGAMIN Fº, H. 1959. A absorção de Nitrogênio, Fósforo, Potássio, Cálcio, Magnésio e Enxofre Pela Cana-de-Açúcar, Co 419, o seu Crescimento em Função da Idade. *Anais da ESALQ, Piracicaba*, 16: 167-190.
- CENICAÑA. 1995. El Cultivo de la Caña en la Zona Azucarera de Colombia. Cali, Colombia. 412 p.
- CLEMENTS, H.F. 1980. Sugar Cane Crop-logging and Crop Control; Principles and Practices. London, Pitman Publ. Ltd. 519 p.

- CORDEIRO, DA. 1978. Efeitos da Calagem e da Adubação Potássica Sobre a Produção de Colmo e o Equilíbrio Nutricional da Cana-de-Açúcar (*Saccharum spp*). Tese M.Sc. Piracicaba, ESALQ/USP. 58 p.
- CUÉLLAR AYALA, I. 1983. Potasio en los Principales Tipos de Suelos de las Plantaciones Cañeras de Cuba y Efectividad de la Fertilización Potásica de la Caña de Azúcar. In: Resúmenes de Tesis de Doctorado del INICA (1964-1994), Habana, Cuba, 1994. Instituto Nacional de Investigaciones de la Caña de Azúcar (INICA) p: 34-35.
- CHACÓN S., B.; CHACÓN S., J. 1980. Contaminación por Nitratos en Aguas Subterráneas de la Cuenca Superior del Río Cañas, Guanacaste. *Agronomía Costarricense*. 4(2): 183-186.
- CHANG, SS.; JACKSON, ML. 1957. Fractionation of Soil Phosphorus. *Soil Science* 84:133-134.
- CHAVARRIA, E.; VILLALOBOS, C.; CHAVES, M. 1999 Evaluación del Efecto de 5 Dosis de Fósforo Sobre la Producción de Caña de Azúcar en un Inceptisol de Esparza, Puntarenas. In: Congreso Nacional Agronómico y de Recursos Naturales, 11, San José, Costa Rica, 1999. Memoria: Recursos Naturales y Producción Animal. San José, Colegio de Ingenieros Agrónomos: EUNED. Volúmen 3. p: 345.
- CHAVERRI, J. 1958. Fraccionamiento del Fósforo en 16 Suelos de Costa Rica. In: Costa Rica. STICA. Laboratorio de Investigaciones Agronómicas; Informe Anual 1958. San José. 16 p.
- CHAVES SOLERA, M. A. 1983. Nuevas Recomendaciones para la Fertilización de la Caña de Azúcar en Costa Rica. *Boletín Informativo DIECA (Costa Rica) Año 1, N° 4. Diciembre*. p: 1-3.
- CHAVES SOLERA, M. A.; CORRALES RODRIGUEZ, J. L. 1984. Estudio comparativo de fórmulas y dosis fertilizantes con un complemento de magnesio sobre los rendimientos de la caña de azúcar. In: Congreso Agronómico Nacional, 6, San José, Costa Rica, 1984. Resúmenes. San José, Colegio de Ingenieros Agrónomos, Julio. Volumen 1. p: 60-61.
- CHAVES SOLERA, M. A. 1985. Las Vinazas en la Fertilización de la Caña de Azúcar. *-El Agricultor Costarricense* 43(9-10): 174-177.
- CHAVES SOLERA, M. A.; CORRALES RODRIGUEZ, J. L. 1985a. Respuesta de la Caña de Azúcar a la Fertilización Fosfórica en una Zona de Altura, Promedio de Dos Cortes. In: Congreso de Tecnología Azucarera de Centroamérica y Panamá, 6 y Simposio Nacional de Caña de Azúcar, 3, Ciudad Guatemala, Guatemala, 1985. Memorias. Guatemala, Asociación de Técnicos Azucareros de Guatemala. Volumen Campo. Setiembre. p: 521-544.
- CHAVES SOLERA, M. A.; RAMIREZ M., G.; SALAZAR Q., J. 1985b. Evaluación de Rocas Fosfóricas como Fuente de Fósforo en la Caña de Azúcar. Primer Corte. In: Congreso de Tecnología Azucarera de Centroamérica y Panamá, 6 y Simposio Nacional de Caña de Azúcar, 3, Ciudad Guatemala, Guatemala, 1985. Memorias. Guatemala, Asociación de Técnicos Azucareros de Guatemala. Volumen Campo. Setiembre. p: 491-519.
- CHAVES SOLERA, M.A. 1986a. Requerimientos, Extracción y Remoción de Nutrientes por la Caña de Azúcar. *Boletín Informativo DIECA (Costa Rica)*. Año 4, N° 29. p: 1-2.
- CHAVES, M. 1986b. Efecto de enmiendas, fuentes y dosis de potasio sobre los rendimientos agroindustriales de la caña de azúcar, en Platanillo de Turrialba, primer corte. In: Congreso Agronómico Nacional, 7 y Congreso de Horticultura ASHS - Región Tropical, 33, Heredia, Costa Rica, 1986. Resúmenes. San José, Colegio de Ingenieros Agrónomos, Sociedad Americana de Ciencias Hortícolas Región Tropical - ASHS, CATIE y W.K. Kellogg, Julio. p: 106-107.

- CHAVES, M.; ARREA, M. 1986. Fertilización con N, P, K en la Caña de Azúcar en un Suelo Ultisol de Platanillo de Turrialba, Promedio de 3 Cortes. In: Congreso Agronómico Nacional, 7 y Congreso de Horticultura ASHS - Región Tropical, 33, Heredia, Costa Rica, 1986. Resúmenes. San José, Colegio de Ingenieros Agrónomos, Sociedad Americana de Ciencias Hortícolas Región Tropical - ASHS, CATIE y W.K. Kellogg, Julio. p: 110-112.
- CHAVES SOLERA, M. A. 1988. Efeito de Relações Ca: Mg, Utilizando Carbonatos e Sulfatos, Sobre o Crescimento e a Nutrição Mineral da Cana-de-Açúcar. Tesis Magister Scientiae. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, Brasil. 186 p.
- CHAVES S., M. A. 1989. Nutrición de la caña de azúcar en Costa Rica, sus logros y la necesidad de nuevos enfoques en su estudio. In: Congreso Agronómico Nacional, 8, Cartago, Costa Rica. 1989. Resúmenes. San José, Colegio de Ingenieros Agrónomos, Julio. Volumen 1. p: 80-81.
- CHAVES S., M. A.; SALAZAR, J.; GUZMAN, G. 1989a. Efecto de seis dosis crecientes de nitrógeno sobre los rendimientos agroindustriales de la variedad de caña de azúcar "H 44-3098". Promedio de dos cosechas. In: Congreso Agronómico Nacional, 8, Cartago, Costa Rica, 1989. Resúmenes. San José, Colegio de Ingenieros Agrónomos, Julio. Volumen 1. p: 106-107.
- CHAVES S., M. A.; SALAZAR, J. 1989b. El uso de las concentraciones de N y K en la sección 8-10 del tallo, como criterio para determinar el estado de madurez de la caña de azúcar. In: Congreso Agronómico Nacional, 8, Cartago, Costa Rica, 1989. Resúmenes. San José, Colegio de Ingenieros Agrónomos, Julio. Volumen 1. p: 59-61.
- CHAVES S., M. A.; SALAZAR, J. 1989c. Efecto de seis dosis crecientes de potasio sobre los rendimientos agroindustriales de la variedad de caña de azúcar "H 44-3098". Promedio de dos cosechas. In: Congreso Agronómico Nacional, 8, Cartago, Costa Rica, 1989. Resúmenes. San José, Colegio de Ingenieros Agrónomos, Julio. Volumen 1. p: 74-75.
- CHAVES, M. A.; ORTUÑO, F.; GUZMAN, G. 1989d. Efecto de enmiendas, fuentes y dosis de potasio sobre los rendimientos agroindustriales de la variedad de caña de azúcar "H 50-7209", en Platanillo de Turrialba. Promedio de dos cosechas. In: Congreso Agronómico Nacional, 8, Cartago, Costa Rica, 1989. Resúmenes. San José, Colegio de Ingenieros Agrónomos, Julio. Volumen 1. p: 84-85.
- CHAVES S., M. A.; SALAZAR, J.; GUZMAN, G.; MADRIZ, T. 1989e. Respuesta de la caña de azúcar, variedad "H 44-3098" a la interacción N - K en Hacienda Juan Viñas, promedio de dos cosechas. In: Congreso Agronómico Nacional, 8, Cartago, Costa Rica, 1989. Resúmenes. San José, Colegio de Ingenieros Agrónomos, Julio. Volumen 1. p: 124-125.
- CHAVES SOLERA, M. A.; AGUILAR QUIROS, F. 1991. Caña de Azúcar (*Saccharum spp* gramineae). San José, Costa Rica. CONITTA/MAG/UNED, Serie ITTA No. 4, San José. 33 p.
- CHAVES SOLERA, M.A. 1993. Importancia de las Características de Calidad de los Correctivos de Acidez del Suelo: Desarrollo de un Ejemplo Práctico para su Cálculo. San José, Costa Rica, DIECA, Junio. 41 p.
- CHAVES S., M. A.; GUZMAN S., G. 1993a. Valoración de la Composición Química de Muestras de Cachaza Fresca Procedentes de Ocho Ingenios de las Cinco Regiones Productoras de Caña de Azúcar de Costa Rica. In: Participación de DIECA en el IX Congreso Nacional Agronómico y de Recursos Naturales. San José, Costa Rica, DIECA. Octubre. p: 151.
- CHAVES S., M. A.; GUZMAN S., G. 1993b. Variación de la Composición Química de la Cachaza Fresca de Ocho Ingenios Azucareros de Costa Rica Durante la zafra 1992-93. In: Participación de DIECA en el IX Congreso Nacional Agronómico y de Recursos Naturales. San José, Costa Rica, DIECA. Octubre. p: 152-153.

- CHAVES SOLERA, M.A.; ALVARADO H., A. 1994. Manejo de la Fertilización en Plantaciones de Caña de Azúcar (*Saccharum spp*) en Andisoles de Ladera de Costa Rica. San José, Costa Rica. DIECA. Julio. 41 p. También en: Memorias 15th World Congress of Soil Science International Society of Soil Science (ISSS). Acapulco, México, del 11 al 15 de julio de 1994. Volumen 7 a. p: 353-372.
- CHAVES SOLERA, M. 1996. Experiencias con la Fertilización de la Caña de Azúcar en Costa Rica. In: CONGRESO DE ATACORI “Cámara de Productores de Caña del Pacífico”, 10, Guanacaste, Costa Rica, 1996. Memoria. San José, Asociación de Técnicos Azucareros de Costa Rica. p: 76-84.
- CHAVES, M.; MESÉN, R.; BARRANTES, J.C. 1996a. Respuesta de la Caña de Azúcar a la Aplicación de Tres Dosis de Carbonato de Calcio en Interacción con Cuatro Dosis de Cachaza, Promedio de Dos Cosechas en un Ultisol de Pérez Zeledón. In: Congreso Nacional Agronómico y de Recursos Naturales, 10, San José, Costa Rica, 1996. Memoria: Suelos. San José, Colegio de Ingenieros Agrónomos, Asociación Costarricense de Fitopatología y Asociación Costarricense de Suelos: EUNED, EUNA. Volumen 3. p: 139.
- CHAVES, M.; ANGULO, A.; GUZMÁN, G. 1996b. Efecto del Tiempo de Descomposición Sobre los Contenidos Químicos de la Cachaza Originada por la Agroindustria Azucarera. In: Congreso Nacional Agronómico y de Recursos Naturales, 10, San José, Costa Rica, 1996. Memoria: Suelos. San José, Colegio de Ingenieros Agrónomos, Asociación Costarricense de Fitopatología y Asociación Costarricense de Suelos: EUNED, EUNA. Volumen 3. p: 174.
- CHAVES SOLERA, M. 1997a. Resumen de las Actividades de Generación y Transferencia de Tecnología más Sobresalientes Obtenidas por DIECA Durante 1996. San José, Costa Rica, DIECA, junio. 37 p.
- CHAVES SOLERA, M.A. 1997b. El Nitrógeno y la Caña de Azúcar. In: Congreso de ATACORI “Roberto Mayorga C.”, 11, San Carlos Costa Rica, 1997. Memoria. San José, ATACORI. Tomo I p: 39-65.
- CHAVES SOLERA, M. A. 1998a. Sugarcane Research and Extension Center –DIECA. In: World Meeting, 1, and Latinamerican and the Caribbean Meeting of the Directors of Sugarcane Research Centers, 7, Guatemala, 1998. Sugarcane Research Center’s Presentations. Guatemala. CENGICANA, GEPLACEA, ASAGUA, 19-25 July 1998. p: 28-38.
- CHAVES SOLERA, M.A. 1998b. Participación de DIECA en las Actividades de Generación y Transferencia de Tecnología Desarrolladas en el Cultivo de la Caña de Azúcar en Costa Rica. San José, Costa Rica, DIECA. Julio. 49 p.
- CHAVES SOLERA, M. 1998c. El Potasio y la Caña de Azúcar. In: Congreso de ATACORI “Álvaro Chavarría P.”, 12, Carrillo, Guanacaste, Costa Rica, 1998. Memoria. San José, ATACORI. p: 90-102.
- CHAVES, M.A. 1999. Nutrición y Fertilización de la Caña de Azúcar en Costa Rica. In: Congreso Nacional Agronómico y de Recursos Naturales, 11, San José, Costa Rica, 1999. Memoria: Recursos Naturales y Producción Animal. San José, Colegio de Ingenieros Agrónomos: EUNED. Volúmen 3. p: 193-214
- CHAVES, M.; ANGULO, A.; GUZMAN, G. 1999. Consecuencias del Tiempo de Almacenamiento de la Cachaza en el Campo Sobre su Contenido Químico y su Riqueza Nutricional. In: Congreso Nacional Agronómico y de Recursos Naturales, 11, San José, Costa Rica, 1999. Memoria: Recursos Naturales y Producción Animal. San José, Colegio de Ingenieros Agrónomos: EUNED. Volúmen 3. p: 73.

- CHAVES, M.; GUZMAN, G. 1999. Efecto del Período de Descomposición en el Campo Sobre los Contenidos Químicos de Cachaza Procedente de CoopeVictoria. In: Congreso Nacional Agronómico y de Recursos Naturales, 11, San José, Costa Rica, 1999. Memoria: Recursos Naturales y Producción Animal. San José, Colegio de Ingenieros Agrónomos: EUNED. Volúmen 3. p: 422.
- CHAVES, M.; BERMUDEZ, L.; PESSOA, F. 1999a. Índice de Rendimiento Industrial en la Producción de Cachaza por Parte de los Ingenios Azucareros de Costa Rica. In: Congreso Nacional Agronómico y de Recursos Naturales, 11, San José, Costa Rica, 1999. Memoria: Recursos Naturales y Producción Animal. San José, Colegio de Ingenieros Agrónomos: EUNED. Volúmen 3. p: 420.
- CHAVES, M.; BERMUDEZ, L.; PESSOA, F. 1999b. Producción de Cachaza por los Ingenios Azucareros de Costa Rica, Durante el Período 1994-1999. In: Congreso Nacional Agronómico y de Recursos Naturales, 11, San José, Costa Rica, 1999. Memoria: Recursos Naturales y Producción Animal. San José, Colegio de Ingenieros Agrónomos: EUNED. Volúmen 3. p: 421.
- CHAVES, M.; RODRIGUEZ, M.; ANGULO, A. 1999. Fertilización de las Plantaciones Comerciales de Caña de Azúcar en la Región de Guanacaste. In: Congreso Nacional Agronómico y de Recursos Naturales, 11, San José, Costa Rica, 1999. Memoria: Recursos Naturales y Producción Animal. San José, Colegio de Ingenieros Agrónomos: EUNED. Volúmen 3. p: 339.
- CHAVES, M.; RODRIGUEZ, M.; GUZMAN, G. 1999. Evaluación Química de Muestras de Cachaza Proveniente de Dos Ingenios Azucareros de Guanacaste Sometidas a Descomposición en el Campo. In: Congreso Nacional Agronómico y de Recursos Naturales, 11, San José, Costa Rica, 1999. Memoria: Recursos Naturales y Producción Animal. San José, Colegio de Ingenieros Agrónomos: EUNED. Volúmen 3. p: 423.
- .CHEN, JCP. 1991. Manual del Azúcar de Caña: para Fabricantes de Azúcar de Caña y Químicos Especializados. 1era. Ed. Editorial LIMUSA S.A. de C.V. México. p: 173, 174,179.
- CHUI, F.; SAMUELS, G. 1981. Evaluaciones de la Eficiencia del N Aplicado como Fertilizante en Cultivos Irrigados de Plantillas y Retoños de Caña de Azúcar. Boletín GEPLACEA N° 20, Octubre - Diciembre. 4 p.
- DIBB, DW.; THOMPSON JR, WR. 1985. Interaction of Potassium with Other Nutrients. In: Symposium International of Potassium in Agriculture. Atlanta, Georgia, EUA, 1985. Proceeding. Wisconsin-USA. American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America. p: 515-533.
- DIECA. 1993. Informe Anual de Labores 1992. San José, Costa Rica. DIECA. p: 138-143.
- DIECA. 1995. Informe Anual de Labores 1994. San José, Costa Rica, DIECA. 268 p.
- DIECA. 1997. Informe Anual de Labores 1996. San José, Costa Rica, DIECA.
- DROSSDOFF, M. *et al.* 1975. Suelos de las Regiones Tropicales Húmedas. Buenos Aires, Argentina, Ediciones Mary Mar. 269 p.
- FASSBENDER, H.W. 1969. Estudio de Fósforo en Suelos de América Central. IV. Capacidad de Fijación de Fósforo y su Relación con Características Edáficas. Turrialba 19(4): 497-505.
- FASSBENDER, H. W.; MOLINA, R. 1969. Influencia de Enmiendas Calcáreas y Silicatadas sobre el Efecto de Fertilizantes Fosfatados en Suelos Derivados de Ceniza Volcánica en Costa Rica. In: Panel sobre Suelos Derivados de Cenizas Volcánicas de América Latina. Turrialba, Costa Rica, 1969. Turrialba, IICA. p: C.2 - C.2.12.

- FASSBENDER, H.W. 1994. Química de Suelos con Énfasis en Suelos de América Latina. Hans W. Fassbender y Elemer Bornemisza. 2da ed. Rev. San José, Costa Rica: IICA. p: 255-312.
- FIXEN, P.E. 1995. Dinámica Suelo-Cultivo del Fósforo y Manejo de los Fertilizantes Fosfatados (Parte III). *Informaciones Agronómicas* 18: 3-5. Enero.
- FIXEN, P.E. 1996. Factores que Afectan la Respuesta de los Cultivos a la Aplicación de Fósforo. *Informaciones Agronómicas* 22: 4-5. Enero.
- GARCÍA CARRIELLO, A. 1973. Respuesta a la Fertilización con Fósforo y Azufre en Algunos Suelos Cañeros. Tesis Ing.Agr. San José, Universidad de Costa Rica, Facultad de Agronomía. 69 p.
- GARCÍA ESPINOZA, A. 1984. Manual de Campo en Caña de Azúcar. 3era ed. México. Instituto para el Mejoramiento de la Producción de Azúcar (IMPA). 469 p.
- GOEDERT, W.J.; SOUSA, DMG. 1986a. Uso Eficiente de Fertilizantes Fosfatados. *In: Seminario Fósforo, Calcio, Magnésio, Enxofre e Micronutrientes – Situação atual e Perspectivas na Agricultura, São Paulo, 13 de dezembro, 1984. Anais. São Paulo, MANAH S/A. p: 21-59.*
- GOEDERT, W.J.; SOUSA, DMG.; LOBATO, E. 1986b. Fósforo. *In: Solos dos Cerrados: Tecnologías e Estratégias de Manejo. Wenceslau J. Goedert (Editor). Sao Paulo: Nobel; Brasília; EMBRAPA, Centro de Pesquisa Agropecuaria dos Cerrados. p: 129-166.*
- GRACIOLLI, L.A. 1982. Bactérias Fixadoras de Nitrogênio em Caña-de Açúcar (*Saccharum spp*) em Folhas, Caules e Raízes. Tese M.Sc. Piracicaba, ESALQ/USP. 49 p.
- HAAG, H.P. 1965. Estudos de Nutrição Mineral na Caña-de-Açúcar (*Saccharum officinarum L.*) Variedade CB41-76 Cultivada em Solução Nutritiva. Tese Livre Docente. Piracicaba, ESALQ/USP. 141 p.
- HAAG, H.P. 1987. Nutrição Mineral da Cana-de-Açúcar. *In: Cana-de-Açúcar: Cultivo e Utilização. Campinas, FUNDAÇÃO Cargill. V. 1. p: 88-162.*
- HUBER, DM; ARNY, DC. 1985. Interactions of Potassium with Plant Disease. *In: Symposium International of Potassium in Agriculture. Atlanta, Georgia, EUA, 1985. Proceeding. Wisconsin-USA. American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America. p: 467-488.*
- HUMBERT, R.P. 1974. El Cultivo de la Caña de Azúcar. México, Ed. Continental. 719 p.
- HUNSIGI, G.; SRIVASTAVA, SC. 1983. Potassium Fertilization of Sugar Cane. *Sugar Cane* 1:9 - 18.
- INSTITUTO DE LA POTASA Y EL FOSFORO. 1988. Manual de Fertilidad de los Suelos. 1era Impresión en Español. Quito, Ecuador, INPOFOS. p: 36-43.
- JONES, J.R., J.B.; WOLF, B.; MILLS, H.A. 1991. Plant Analysis Handbook: a Practical Sampling, Preparation, Analysis, and Interpretation Guide. Micro-Macro Publishing, Inc. Georgia, USA. p: 130.
- LEIVA ACUÑA, J. M. 1986. Respuesta de la Caña de Azúcar (*Saccharum officinarum*) a Dosis Crecientes de Fósforo en un Suelo de Pérez Zeledón. Tesis Ing.Agr. San José, Universidad de Costa Rica, Facultad de Agronomía. 126 p.
- MALAVOLTA, E. 1976. Manual de Química Agrícola: Nutrição Mineral de Plantas e Fertilidade do Solo. São Paulo. Ed. Agrônômica Ceres. 528 p.

- MALAVOLTA, E. 1980a. Elementos de Nutrição Mineral de Plantas. São Paulo, Brasil: Ed. Agronômica CERES LTDA. 254 p.
- MALAVOLTA, E. 1980b. O Fósforo na Agricultura Brasileira. IPT. Boletim 9: 187-206
- MALAVOLTA, E. 1981. Manual de Química Agrícola: Adubos y Adubação. 3ª ed. São Paulo, Brasil. Editora Agronômica Ceres Ltda. 607 p.
- MALAVOLTA, E. 1982a. Nutrição Mineral e Adubação da Cana-de Açúcar. 1. ed. Piracicaba, São Paulo. Departamento de Serviços Técnicos Agronômicos. 76 p.
- MALAVOLTA, E. 1982b. O Potássio e a Planta. 4ª ed. Instituto da Potassa & Fosfato (EUA), Instituto Internacional da Potassa (SUIÇA). Boletim Técnico 1. 61 p.
- MALAVOLTA, E.; CROCOMO, OJ. 1982. O Potássio e a Planta. In: Simposio sobre Potássio na Agricultura Brasileira. Londrina, Brasil, 1982. Anais. Piracicaba: Instituto da Potassa & Fosfato; Instituto Internacional da Potassa; Fundação IAPAR. p: 95-162.
- MALAVOLTA, E.; USHERWOOD, NR. 1982. Adubos e Adubação Potássica. 4ª ed. Instituto da Potassa & Fosfato (EUA), Instituto Internacional da Potassa (Suiça). Boletim Técnico 3, Setembro. 56 p.
- MALAVOLTA, E. 1983. Adubos e Adubação Fosfatada. Piracicaba SP, Brasil. Fertilizantes MITSUI S.A. 61 p.
- MALAVOLTA, E.; NEPTUNE, A.M.L. 1983. Características e Eficiência dos Adubos Nitrogenados. São Paulo: SN Centro de Pesquisa e Promoção de Sulfato de Amônio. 45 p. (Boletim Técnico Nº 2).
- MARRIEL, I.E.; KONZEN, E.A.; ALVARENGA, R.C.; SANTOS DOS, H.L. 1987. Tratamento e Utilização de Resíduos Orgânicos. Informe Agropecuario (Belo Horizonte) 13 (147): 24-36.
- MARTÍN ORIA, J. R.; GÁLVEZ R., G.; ARMAS U., R.; ESPINOZA O., R.; VIGOA H., R.; LEÓN M., A. 1987. La Caña de Azúcar en Cuba. Ed. Científico-Técnica, Ministerio de Cultura. La Habana. 672 p.
- MAYORGA, R.; MÉNDEZ, J. 1986. Evaluación de la Respuesta de la Caña de Azúcar (cv NCo 310) a Diferentes Fuentes de Nitrógeno, Métodos de Aplicación. Cañas, Guanacaste. Ingenio Taboga, S.A. sp.
- MENGEL, K. 1982. Factores e Processos Que Afetam as Necessidades de Potássio Das Plantas. In: Simpósio sobre Potássio na Agricultura Brasileira. Londrina, Brasil, 1982. Anais. Piracicaba: Instituto da Potassa & Fosfato; Instituto Internacional da Potassa; Fundação IAPAR. p: 195-212.
- MESÉN, R.; BARRANTES, J.C.; CHAVES, M. 1996. Efecto de Seis Dosis de Fósforo Aplicadas en un Ultisol de Pérez Zeledón, Sobre los Índices de Rendimiento Agroindustrial de la Caña de Azúcar, Promedio de Dos Cosechas. In: Congreso Nacional Agronómico y de Recursos Naturales, 10, San José, Costa Rica, 1996. Memoria: Suelos. San José, Colegio de Ingenieros Agrónomos, Asociación Costarricense de Fitopatología y Asociación Costarricense de Suelos: EUNED, EUNA. Volumen 3. p: 159.
- MIELNICZUK, J. 1982. O Potássio No Solo. 4ª ed. Instituto da Potassa & Fosfato (EUA), Instituto Internacional da Potassa (SUIÇA). Boletim Técnico 2, setembro. 79 p.
- MILLS, H.A.; JONES, J.R., J.B. 1996. Plant Analysis Handbook II: a Practical Sampling, Preparation, Analysis, and Interpretation Guide. MicroMacro Publishing, Inc. Georgia, USA. p: 189.

- MONTES DE OCA P., P.; PANIAGUA VÁSQUEZ, A.; ROJAS RODRÍGUEZ, I. 1989. Evaluación de tres dosis de calcio, magnesio, potasio bajo condiciones de invernadero en los suelos de Peñas Blancas, Cajón y La Unión de Pérez Zeledón. In: CONGRESO DIECA, 2, San José, Costa Rica, 1988. Memorias. San José, DIECA. p: 58-79.
- OCHOA ALEJO, N. 1980. Efeito do Nitrogênio Nítrico, Amoniacal e de Uréia sobre o Crescimento, Carboidratos e Compostos Nitrogenados em Cana-de-Açúcar (*Saccharum spp.* cv. NA 56-79) Cultivada em Solução Nutritiva. Tese M.Sc. Piracicaba, ESALQ/USP. 116 p.
- ODIO CASTILLO, B. 1985. Tratamiento y Aprovechamiento de Vinazas. Boletín Técnico Informativo ATACORI (Costa Rica). Octubre. 21 p.
- OLIVEIRA FILHO, J.M.; CARVALHO, M.A.; GUEDES de A., G.A. 1987. Materia Orgânica do Solo. Informe Agropecuario (Belo Horizonte) 13 (147): 22-24.
- ORLANDO FILHO, J. 1976. Influência Varietal e do Solo no Estado Nutricional da Cana-de-Açúcar (*Saccharum spp*) Pelo Análise Foliar. Tese M. Sc. Piracicaba, ESALQ/USP. 63 p.
- ORLANDO FILHO, J.; HAAG, H.P. 1976. Influência Varietal e do Solo no Estado Nutricional da Cana-de-Açúcar (*Saccharum spp*) Pela Análise Foliar. Araras, IAA/PLANALSUCAR-COSUL. 2(1): 3-52 p. (Boletim Técnico N° 2).
- ORLANDO FILHO, J. 1978. Absorção dos Macronutrientes Pela Cana-de-Açúcar (*Saccharum spp*) Variedade CB 41-76, em Três Grandes Grupos de Solos no Estado de São Paulo. Tese Dr. Piracicaba, ESALQ/USP. 154 p.
- ORLANDO FILHO, J.; HAAG, H.P.; ZAMBELLO JR., E. 1980. Crescimento e Absorção de Macronutrientes Pela Cana-de-Açúcar, Variedade CB 41-76, em Função da Idade, em Solos do Estado de São Paulo. Boletim Técnico PLANALSUCAR, Piracicaba. 2 (1): 1-28.
- ORLANDO FILHO, J. 1982. Nutrição e Adubação Potássica da Cana-de-Açúcar no Brasil. In: Simpósio sobre Potássio na Agricultura Brasileira. Londrina, Brasil, 1982. Anais. Piracicaba: Instituto da Potassa & Fosfato; Instituto Internacional da Potassa; Fundação IAPAR. p: 393-419.
- ORLANDO FILHO, J. (Coord.) 1983. Nutrição e Adubação Da Cana-de-Açúcar No Brasil. Piracicaba, IAA/PLANALSUCAR. 369 p.
- ORLANDO FILHO, J. 1985. Potassium Nutrition of Sugarcane. In: Symposium International of Potassium in Agriculture. Atlanta, Georgia, EUA, 1985. Proceeding. Wisconsin-USA. American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America. p: 1045-1062.
- ORLANDO FILHO, J; MACEDO, N; TOKESHI, H. 1994. Seja o Doutor do Seu canavial. Encarte do Informações Agronômicas No. 67. p:5 setembro.
- ORTEGA, E.; MUSIENKO, N.; DIEZ – CABEZAS, M. 1979. Comportamiento del Pi, Fitina y P de Macroenergía en Relación con su Papel en los Procesos Fisiológicos de la Caña de Azúcar. Memoria 42 Conferencia Asociación Técnicos Azucareros de Cuba (ATAC) 3: 303 –315.
- PACHECO SALAZAR, R. 1977. La Nutrición Fosfórica en Dos Suelos de Diferente Fertilidad. Tesis Ing. Agr. San José, Universidad de Costa Rica, Facultad de Agronomía. 42 p.
- PARISH, D.H. 1965. The Efficacy of Nitrogenous Fertilizers. Proceedings ISSCT, 12: 372-379.

- PEIXOTO, AA. 1980. Efeitos de Cálcio, Magnésio e Potássio e suas Relações, Na Produção de Cana-de-Açúcar (**Saccharum spp**), em um Solo Gley Húmico do Norte Fluminense. Tese M.Sc. Vicosá, Minas Gerais, Universidade Federal de Viçosa. 48 p.
- PINNA C., J.; VALDIVIA V., S. 1978. Volatilización del Nitrógeno de la Urea Aplicada Superficialmente o Enterrada en Suelos Cañeros Calcáreos. Boletín GEPLACEA N° 5, Enero-Marzo. 6 p.
- PRETTY, KM. 1982. O Potássio e a Qualidade da Produção Agrícola. In: Simpósio sobre Potássio na Agricultura Brasileira. Londrina, Brasil, 1982. Anais. Piracicaba: Instituto da Potassa & Fosfato; Instituto Internacional da Potassa; Fundação IAPAR. p: 177-194.
- PUENTE BERUMEN, A.; PAREDES GUERRERO, J. 1988. Uso del Amoníaco Anhidro como Fertilizante en la Agricultura Mexicana. Boletín Técnico GEPLACEA, enero-junio. 7 p.
- QUINTERO DURÁN, R.; JARAMILLO, L.A. 1995. Pruebas de Manejo del Nitrógeno en Caña de Azúcar. Cali, Colombia. CENICAÑA. 12 p.
- QUINTERO D., R. 1997. Fertilización Nitrogenada en Caña de Azúcar. Cali, Colombia. CENICAÑA. 15 p.
- QUIRÓS VALVERDE, J.M. 1993. Evaluación del Efecto de Seis Dosis Crecientes de Nitrógeno en Tres Clones Comerciales de Caña de Azúcar (**Saccharum spp**), Ciclo Planta, en un Ultisol de Pérez Zeledón. Tesis Ing. Agr. San José, Universidad de Costa Rica, Facultad de Agronomía. 128 p.
- RAIJ, B.VAN. 1984. Fertilizantes Fosfatados e Uso. Informações Agronômicas 26: 1-2. Junho.
- RAJAN, SSS; FOX, R.L. 1975. Phosphate Adsorption by Soils. II. Reactions in Tropical Acid Soils. Soils Science Soc. Amer. Proc. 39: 846-851.
- RAMÍREZ RODRÍGUEZ, C. A. 1964. Respuesta de la Caña de Azúcar a la Fertilización Fosfórica Interpretada con Base en el Análisis del Tallo. Tesis Ing.Agr. San José, Universidad de Costa Rica, Facultad de Agronomía. 50 p.
- RAO, K.P.; RAINS, D.W. 1976. Nitrate Absorption by Barley. Plant Physiology 57: 55-58.
- RITCHEY, DK. 1982. O Potássio nos Oxissolos e Ultissolos dos Trópicos Umidos. Instituto da Potassa & Fosfato (EUA), Instituto Internacional da Potassa (SUIÇA). Boletim Técnico 7, dezembro. 69 p.
- ROBLES, F. 1984. Respuesta de la Caña de Azúcar Siembra y 1 Soca al N-P-K- en la Zona Alta de San Carlos. In: Congreso Agronómico Nacional, 6, San José, Costa Rica, 1984. Resúmenes. San José, Colegio de Ingenieros Agrónomos. Volumen 1. p: 64.
- ROBLES ROSS, C.A. 1994. Los Fertilizantes Líquidos y las Experiencias en Costa Rica. In: Curso: Fabricación y Uso de Fertilizantes. San José, Costa Rica. Cámara Insumos Agropecuarios, MAG, Setiembre. p: 18-30.
- RODRÍGUEZ, J. M. 1987. Efecto de la Aplicación de las Vinazas como Fertirrigante de la Caña de Azúcar en un Suelo Arcilloso. Tesis Lic. Ing. Agrícola. San José, Universidad de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Agrícola. 109 p.
- RODRÍGUEZ R., M.; CHACÓN A., M. 1993. Estudio de Interacción de Nutrientes (N-P-K) en un Vertisol de Liberia, Guanacaste, sobre los Rendimientos Agroindustriales de la Caña de Azúcar. Promedio de Cuatro Cosechas. In: Congreso Nacional Agronómico y de Recursos Naturales, 9, San José, Costa Rica, 1993. Resúmenes. San José, Colegio de Ingenieros Agrónomos. Volumen 2 (1): 58.

- RODRIGUEZ, M.; CHAVES, M.; MOJICA, F. 1999. Estudio del Efecto Químico Valorado a Nivel de Laboratorio de la Aplicación de Seis Dosis Crecientes de Vinaza en Cuatro Profundidades, en Dos Tipos de Suelo: Dystric haplustand y Ustic humitropept. In: Congreso Nacional Agronómico y de Recursos Naturales, 11, San José, Costa Rica, 1999. Memoria: Recursos Naturales y Protección Animal. San José, Colegio de Ingenieros Agrónomos: EUNED. Volúmen 3. p: 76.
- RUIZ MELÉNDEZ, C. A. 1977. Estudio Preliminar de Fertilización en Caña de Azúcar (*Saccharum officinarum*) en la Unión de Pérez Zeledón. Tesis Ing.Agr. San José, Universidad de Costa Rica, Facultad de Agronomía. 82 p.
- RUIZ, HA. 1986. Efeito do Conteúdo de Água sobre o Transporte de Fósforo em Dois Latossolos. Tese Dr. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, Brasil. 86 p.
- SALAS, R. 1998. Avances en la Fertilización de la Caña de Azúcar en la Zona de Guanacaste. In: Seminario Agrícola Internacional, 1, Heredia, Costa Rica. Memoria. San José, FERTICA, PRO-CHILE. 22-23 abril.
- SALAZAR, J.; CHAVES, M. 1996. Evaluación de Seis Niveles de Tecnología para el Manejo Orgánico de Plantaciones de Caña de Azúcar en Juan Viñas, Caña Planta. In: Congreso Nacional Agronómico y de Recursos Naturales, 10, San José, Costa Rica, 1996. Memoria: Suelos. San José, Colegio de Ingenieros Agrónomos, Asociación Costarricense de Fitopatología y Asociación Costarricense de Suelos: EUNED, EUNA. Volumen 3. p: 167.
- SALAZAR, J.D.; VARGAS, J. 1996a. Evaluación del Efecto de Cinco Dosis de Nitrógeno sobre los Rendimientos Agroindustriales de Tres Variedades Comerciales de Caña de Azúcar, Promedio de Tres Cosechas, en un Inceptisol de San Carlos. In: Congreso Nacional Agronómico y de Recursos Naturales, 10, San José, Costa Rica, 1996. Memoria: Suelos. San José, Colegio de Ingenieros Agrónomos, Asociación Costarricense de Fitopatología y Asociación Costarricense de Suelos: EUNED, EUNA. Volumen 3. p: 162.
- SALAZAR, J.D.; VARGAS, J. 1996b. Respuesta de la Caña de Azúcar, Variedad Pindar, al Fraccionamiento del Nitrógeno y Potasio en Diferentes Épocas de Aplicación Durante Tres Cosechas en San Carlos, Costa Rica. In: CONGRESO DE ATACORI "Cámara de Productores de Caña del Pacífico", 10, Guanacaste, Costa Rica, 1996. Memoria. San José, Asociación de Técnicos Azucareros de Costa Rica. p: 17.
- SÁNCHEZ M., G. 1983. Estudio de la Respuesta del Nitrógeno y del Potasio en dos Suelos del Ingenio Taboga S.A. Cañas, Guanacaste. Ingenio Taboga S.A. Mayo 20 p.
- SANCHEZ, P.A.; UEHARA, G. 1980. Management Considerations for Acid Soils with High Phosphorus Fixation Capacity. In: The Role of Phosphorus in Agriculture. Madison, Wis., ASA-CSSA-SSSA. p: 475-478.
- SANTOS VIEIRA, IM. 1983. Efeito do Potássio sobre a Atividade de Invertases, Teores de Açúcares e Compostos Nitrogenados em Cana-de-Açúcar (*Saccharum spp.* var. NA 56-79) Cultivada em Solução Nutritiva. Tese M. Sc. Piracicaba, ESALQ/USP. 97 p.
- SAUERBECK, D.; GONZÁLEZ, M. A.; CARVAJAL, J. F.; BRICEÑO, J. A. 1976. Determinación de la Zona de Mayor Absorción de 32 P por Raíces de Caña de Azúcar. In: Congreso Agronómico Nacional, 2, San José, Costa Rica, 1976. Resúmenes. San José, Colegio de Ingenieros Agrónomos, Febrero. Volumen 1. p: 59-60.
- SCRADER, L.E. 1984. Functions and Transformations of Nitrogen in Higher Plants. In: Hack, R.D., (ed). Nitrogen in Crop Production. Madison, Wiscounsion, U.S.A. p: 55-65.

- SILVEIRA, J.A.G. 1980. Aspectos Bioquímicos e Fisiológicos da Relação K/N em Cana-de-Açúcar (*Saccharum spp*) cv. NA 56-79 Cultivada em Solução Nutritiva. Tese M. Sc. Piracicaba, ESALQ/USP. 127 p.
- SILVEIRA, J.A.G. 1985. Interações entre Assimilação de Nitrogênio e o Crescimento da Cana - de Açúcar (*Saccharum spp*) Cultivado em Condições de Campo. Tese Dr. Piracicaba, ESALQ/USP. 152 p.
- SING, R.; GILL, H.S.; KRANNA, S.S. 1969. Study of the Correlation of Critical Nitrogen Content of Leaf and Yield of Sugarcane. *Indian J. Agric. Sci.* 39: 523-529.
- SINGH, N.B.; SINGH, R.G.; ALI, S.A. 1985. Response of Sugarcane to Foliar Fertilization of Nitrogen at Different Moisture Stresses. *Indian J. of Agr. Sci.* 55 (9): 582-585.
- SOLORZANO V., N.; MOLINA V., J.; CHAVES S., M. A. 1993. Efecto de cinco dosis crecientes de potasio sobre los rendimientos agroindustriales de dos variedades comerciales de caña de azúcar en la localidad de Esparza de Puntarenas. Promedio de dos cosechas. In: Participación de DIECA en el IX Congreso Nacional Agronómico y de Recursos Naturales. San José, Costa Rica. DIECA. Octubre. p: 143.
- STEWART, M.J. 1969. Potassium and Sugarcane. *The South Africa Sugar Journal*, 53(2): 108-121.
- SUBIRÓS, J.F. 1987. Efecto de la Aplicación de Vinazas en la Producción de Caña de Azúcar y en las Características Químicas del Suelo en un Mollisol de Filadelfia, Guanacaste. In: Congreso Ing. Alvaro Jenkins Morales, 3, Guanacaste, Costa Rica, 1987. Memorias. San José, ATACORI. p: 94-99.
- SUBIRÓS, J. F. 1989. Respuesta de la Caña de Azúcar (*Saccharum officinarum*) a la Fertilización con Nitrato de Amonio en un Molisol, Guanacaste. *Agronomía Costarricense*. 13(1): 1-10.
- SUBIRÓS, J.F.; MOLINA, E. 1992. Efecto de la Aplicación de Vinazas en la Producción de Caña de Azúcar y en las Características Químicas de un Inceptisol de Guanacaste, Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 16(1): 55-60.
- SUBIRÓS RUIZ, J.F. 1995. El Cultivo de la Caña de Azúcar. San José, Costa Rica: UNED. 448 p.
- SUBIRÓS, J.F.; BERTSCH, F. 1996. Utilización de Nitrógeno Líquido en Caña de Azúcar en un Inceptisol de Filadelfia, Guanacaste. In: Congreso Nacional Agronómico y de Recursos Naturales, 10, San José, Costa Rica, 1996. Memoria: Suelos. San José, Colegio de Ingenieros Agrónomos, Asociación Costarricense de Fitopatología y Asociación Costarricense de Suelos: EUNED, EUNA. Volumen 3. p: 152.
- SUTTON, C.D. 1993. ¿Cuál es la Mejor Fuente de Nitrógeno? *Agricultura de las Américas*, Enero-Febrero. p: 6-11.
- SUZUKI, J. 1982. Biossíntese e Acúmulo De Sacarose em Cana-de-Açúcar (*Saccharum spp*): Influência do Ion Potássio Durante Diferentes Estádios de Crescimento em Solução Nutritiva. Tese Dr. Piracicaba, ESALQ/USP. 96 p.
- TERMAN, G.L. 1979. Volatilization Losses of Nitrogen as Ammonia From Surface-Applied Fertilizers, Organic Amendments, and Crop Residues. *Advances Agronomy* 31: 189-223.
- THOMAS, J.R. 1983. Uso del % de N en Hojas de Caña de Azúcar para Predecir los Requerimientos de N del Cultivo. In: Seminarios Inter-Americanos de la Caña de Azúcar: Fertilidad y Manejo de Suelos, 1983, Memorias. Miami, Florida. p: 391-400.

- TISDALE, SL.; NELSON, WL.; BEATON, J; HAVLIN, J. 1993. Soil Fertility and Fertilizer. 5ª. Ed. Columbus, USA, Mac Millan Publishing Co.
- URQUIAGA, S.; BOTTEON, P de TL; LIMA, E.; BODDEY, R.M.; DOBEREINER, J. 1989. Fijación Biológica del Nitrógeno: ¿Fuente Importante de Nitrógeno en el Cultivo de la Caña de Azúcar? Boletín GEPLACEA N° 12, Diciembre. 10 p.
- URQUIAGA, S.; CRUZ KHS., V.; BODDEY, R.M. 1992. Contribution of Nitrogen Fixation to Sugar-Cane: Nitrogen - 15 and Nitrogen Balance Estimates. Soil Sci. Soc. Am. J. 56: 105-114.
- USHERWOOD, NR. 1982. Interação Do Potássio com Outros Ions. In: Simpósio sobre Potássio na Agricultura Brasileira. Londrina, Brasil, 1982. Anais. Piracicaba: Instituto da Potassa & Fosfato; Instituto Internacional da Potassa; Fundação IAPAR. p: 227-247.
- VÁSQUEZ MORERA, A. 1971. Efecto del Riego y la Fertilización Nitrogenada en el Crecimiento Inicial de la Caña de Azúcar. Tesis Ing.Agr. San José, Universidad de Costa Rica, Facultad de Agronomía. 93 p.
- VEGA MOREIRA, G. 1985. Evaluación del Manejo Agronómico de la Caña de Azúcar (*Saccharum officinarum*) en Hacienda La Luisa, S.A. Con Énfasis en la Fertilización Comercial. Práctica Ing.Agr. Grecia, Centro Regional de Occidente, Recinto de Tacaes, Universidad de Costa Rica. 149 p.
- VILLALOBOS RODRÍGUEZ, E. 1974. Reductasa del Nitrato y Fertilización Nitrogenada, Adaptación de un Método para Analizar su Actividad Catalítica en el Campo. Tesis Ing. Agr. San José, Universidad de Costa Rica, Facultad de Agronomía. 67 p.
- VILLALOBOS, E.; CARVAJAL, J. F. 1977. La Actividad de la Reductasa del Nitrato como Guía de la Fertilización Nitrogenada de Cinco Especies Agrícolas. Agronomía Costarricense 1(1): 57-63.
- WOOD, T. 1992. Nitrogen and Sucarcane. South African Sugar Journal, V. 76. N° 9. p: 289-290.
- ZAMBOLIM, L; SIQUEIRA, J.O. 1985. Importancia e Potencial das Associações Micorrizicas para a Agricultura. Belo Horizonte, EPAMIG. 36 p.
- ZÚÑIGA MARTÍNEZ, E. 1972. Contenido y Variación Estacional de N-P-K-Ca y Mg en la Caña de Azúcar. Tesis Ing.Agr. San José, Universidad de Costa Rica, Facultad de Agronomía. 126 p.
- ZÚÑIGA, R.A. 1991. Efecto de Dos Fuentes y Cuatro Niveles de Fósforo en Caña de Azúcar, en Turrialba, Costa Rica. In: Congreso de Tecnología Azucarera de Centroamérica, 9, San José, Costa Rica, 1991. Resúmenes. San José, Asociación de Técnicos Azucareros de Centroamérica (ATACA) p: 11