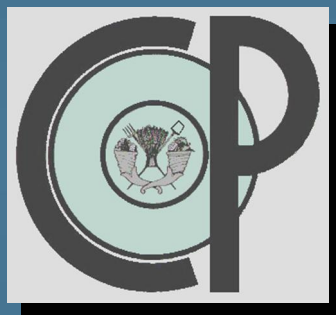


# Manejo Sustentable de la Fertilidad del Suelo y de la Nutrición de la Caña de Azúcar



04 de septiembre de 2008

## Índice

Sección	Página
I Introducción .....	1
II Planeación de la fertilización .....	5
III Diagnóstico del sistema de producción .....	6
3.1 Condiciones climáticas .....	7
3.2 Condiciones edáficas .....	11
IV El balance nutrimental en el sistema de producción de la caña de azúcar .....	16
4.1 Nitrógeno, fósforo y potasio .....	19
4.2 Nutrientes secundarios y elementos menores .....	24
V Generación de las dosis y recomendaciones de aplicación de fertilizantes .....	26
5.1 Generación de recomendaciones de fertilización .....	26
5.2 Dosis de fertilizantes y manejo de la fertilización .....	29
VI Conclusiones .....	35

### Lista de Cuadros

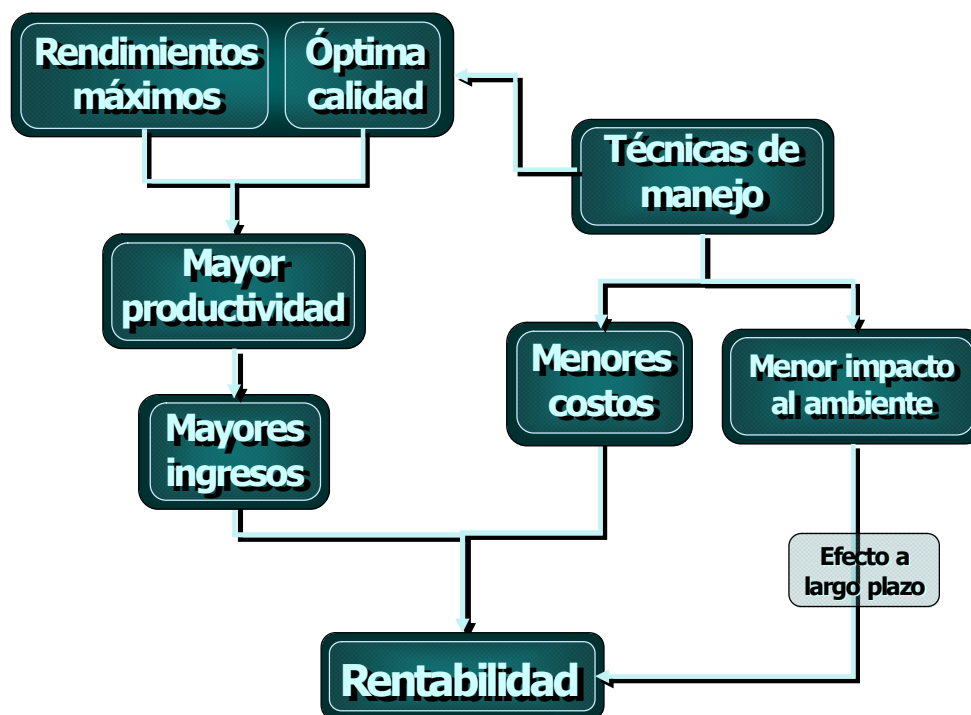
1 Nombre y ubicación de los ingenios azucareros de la República Mexicana donde se llevó a cabo el presente estudio .....	3
2 Distribución de frecuencias de diferentes rangos de temperatura mínima y máxima mensual en los ingenios azucareros del país .....	8
3 Distribución de frecuencia de diferentes rangos de precipitación pluvial total mensual en los ingenios azucareros del país .....	10
4 Indicadores físicos y químicos de la condición edáfica en las áreas de abasto de los ingenios azucareros del país .....	12
5 Distribución de frecuencia de la condición nutrimental del nitrógeno en las áreas de abasto de los ingenios azucareros del país .....	20
6 Distribución de frecuencia de la condición nutrimental del fósforo en las áreas de abasto de los ingenios azucareros del país .....	22
7 Distribución de frecuencia de la condición nutrimental del potasio en las áreas de abasto de los ingenios azucareros del país .....	24
8 Distribución de frecuencia de la condición nutrimental de elementos secundarios de las áreas de abasto de los distintos ingenios azucareros del país .....	25
9 Distribución de frecuencia de la condición nutrimental de elementos menores de las áreas de abasto de los distintos ingenios azucareros del país .....	25
10 Distribución de frecuencia de la dosis de nitrógeno, fósforo y potasio recomendada para cada terreno de las áreas de abasto de los ingenios azucareros del país .....	30
11 Ejemplo de la variación mínima, promedio y máxima de la dosis de fósforo de acuerdo a distintos rangos de oferta de este nutriente por el suelo en terrenos seleccionados de las áreas de abasto de los ingenios azucareros del país .....	31

<b>Lista de Figuras</b>		<b>Página</b>
1	Ruta que se propone seguir para lograr una óptima productividad y rentabilidad del sistema de producción .....	1
2	Efecto que causan los diversos fenómenos considerados en los factores agronómicos, que afectan de manera negativa el crecimiento y/o desarrollo de la caña de azúcar .....	6
3	Promedio mensual de la lluvia total y temperatura (mínima y máxima) en las áreas de abasto de los diferentes ingenios azucareros del país .....	8
4	Algunas de las principales variables que ocasionan desórdenes no nutrimentales a las plantaciones de caña de azúcar en las áreas de abasto de los ingenios azucareros del país .....	11
5	Problemas por alcalinidad o sodicidad en la caña de azúcar .....	13
6	Problemas por acidez extrema en el cultivo de la caña de azúcar .....	13
7	Anegamiento prolongado: a) Encharcamientos superficiales; b) pudrición de las raíces por drenaje impedido en la caña de azúcar .....	14
8	Relación de las distintas variables que afectan la productividad de las plantaciones en las áreas de abasto de los ingenios azucareros del país .....	15
9	Esquema del balance nutrimental donde se relaciona la oferta nutrimental del suelo con la demanda del cultivo .....	17
10	Componentes que influyen sobre la interacción de los nutrientes con el suelo y la fluctuación de la oferta nutrimental .....	18
11	Ruta seguida para evaluar y definir la condición nutrimental de las plantaciones de caña de azúcar en las áreas abasto del país .....	18
12	Relación del rendimiento con el cociente oferta/demanda nutrimental de la caña de azúcar .....	19
13	Esquema para decidir qué tipo de manejo es más conveniente hacer de acuerdo a la condición nutrimental en el sistema de producción .....	27
14	Esquema donde se integran los pasos que seguimos para generar las dosis recomendadas para cada uno de los terrenos muestreados de las áreas de abasto de los distintos ingenios azucareros del país .....	29
15	Variación de la dosis recomendada de acuerdo a la oferta de fósforo del suelo en algunos de los terrenos muestreados de las áreas de abasto de los distintos ingenios azucareros del país .....	30
16	Variación de la dosis recomendada de acuerdo a la oferta de fósforo del suelo, agrupando los datos por meta de rendimiento de la caña de azúcar en algunos de los terrenos muestreados de las áreas de abasto de los ingenios azucareros del país .....	32
17	Resumen de los estudios realizados en la Etapa I y los que se llevarán a cabo durante la Etapa II para generar las recomendaciones de fertilización en las áreas de abasto de los distintos ingenios azucareros del país .....	36

## Recomendación de Aplicación de Enmiendas y Fertilizantes para las Áreas de Abasto de los Ingenios Azucareros del País

### I. Introducción

Los objetivos de alcanzar y mantener una óptima productividad a largo plazo se encuentran entre las principales motivaciones de la actividad agrícola y el cultivo de la caña de azúcar no debe ser la excepción. Un planteamiento hasta cierto punto obvio que permita lograr tales propósitos se presenta en la Figura 1.



**Figura 1.** Ruta que se propone seguir para lograr una óptima productividad y rentabilidad del sistema de producción.

Una forma de mejorar los ingresos es mediante el incremento del rendimiento y calidad de la cosecha, lo cual es factible lograr si se emplean técnicas de manejo apropiadas y que a su vez incluya la menor inversión posible respecto a los costos inherentes a su operación. Si lo anterior se cumple, es viable que los resultados positivos de estas actividades se manifiesten a corto plazo, pero si las prácticas agrícolas tienen un impacto nocivo sobre los recursos naturales, a

través del tiempo se deteriorará su calidad e inexorablemente afectará la salud de la población y la capacidad productiva de la tierra. Por ello, es muy importante tomar en cuenta la necesidad de conservar el ambiente, lo que permitirá mantener una productividad rentable y durable a largo plazo.

El éxito del sistema de producción depende de una serie de factores, los cuales agrupamos de manera arbitraria en tres categorías, mismas que a su vez están integradas por muy diversas variables, esto es:

- a) **Factores Humanos:** Inciden ya sea de manera positiva o negativa sobre la productividad del sistema de producción y de forma directa o indirecta motivando o inhibiendo la inversión de recursos o aplicación de técnicas agrícolas. Como ejemplo tenemos la tenencia de la tierra, influencia de la política agrícola, tendencia del mercado, otorgamiento y liberación de créditos, disponibilidad de mano de obra, fluctuación de los precios de compra y venta de los productos, entre otros.
- b) **Factores Ambientales:** Se refiere a la influencia de las condiciones de suelo y clima que repercuten sobre la calidad y cantidad de los productos a cosechar. Desde el punto de vista edáfico resaltan las propiedades relacionadas con la capacidad de almacenamiento de agua por el suelo (densidad aparente, velocidad de infiltración, porosidad, textura, etc.), susceptibilidad a la erosión (hídrica o eólica), ambiente químico (sales solubles, acidez, alcalinidad), entre otros. En el clima, destacan la distribución, intensidad y frecuencia de la lluvia, temperaturas extremas (mínimas y máximas), vientos, entre otros.
- c) **Factores Agronómicos:** Las variables que influyen sobre la calidad y rendimiento del cultivo pueden modificarse hasta cierto punto mediante prácticas de manejo que se hayan generado, adaptado o adoptado a las condiciones específicas para el sitio de interés, entre ellas destacan el uso de variedades mejoradas, métodos de manejo del agua ya sea de riego o para conservar la humedad en seco, control fitosanitario (plagas, enfermedades y malezas), labranza, uso de insumos (químicos u orgánicos), fertilización, entre otros.

Los tres factores antes citados inciden sobre el éxito o fracaso del sistema de producción a corto y largo plazo. En el presente proyecto nos enfocamos en la delimitación de los factores agronómicos que influyen sobre la productividad y rentabilidad de la caña de azúcar producida en las áreas de abasto de los distintos ingenios azucareros del país (Cuadro 1), haciendo énfasis en la generación de recomendaciones de aplicación de enmiendas y fertilizantes.

**Cuadro 1.** Nombre y ubicación de los ingenios azucareros de la República Mexicana donde se llevó a cabo el presente estudio

Número	Nombre	Estado
1	AA. Sáenz (Xico)	Tamaulipas
2	López Mateos	Oaxaca
3	Alianza Popular	San Luis Potosí
4	Atencingo	Puebla
5	Azuremex-Tenosique	Tabasco
6	Bellavista	Jalisco
7	Calipam	Puebla
8	Casasano	Morelos
9	Central Progreso	Veracruz
10	La Constancia	Veracruz
11	Cuatotolapam	Veracruz
12	El Carmen	Veracruz
13	El Higo	Veracruz
14	El Mante	Tamaulipas
15	El Modelo	Veracruz
16	El Molino	Nayarit
17	El Potrero	Veracruz
18	El Refugio	Oaxaca
19	El Dorado	Sinaloa
20	Emiliano Zapata	Morelos
21	Huixtla	Chiapas
22	La Independencia	Veracruz
23	José Ma. Tala	Jalisco
24	José Ma. Morelos	Jalisco
25	La Concepción	Veracruz
26	La Gloria	Veracruz
27	La Joya	Campeche
28	La Primavera	Sinaloa
29	La Providencia	Veracruz
30	Lázaro Cárdenas	Michoacán
31	Los Mochis	Sinaloa
32	Mahuixtlán	Veracruz
33	Melchor Ocampo	Jalisco
34	Motzorongo	Veracruz
35	Pablo Machado	Oaxaca
36	Pedernales	Michoacán
37	Plan de Ayala	San Luis Potosí
38	Plan de San Luis	San Luis Potosí
39	Presidente Benito Juárez	Tabasco
40	Puga	Nayarit
41	Pujilic	Chiapas
42	Quesería	Colima
43	San Cristóbal	Veracruz
44	Ameca	Jalisco

## ... Continuación del Cuadro 1

Número	Nombre	Estado
45	San Francisco Naranjal	Veracruz
46	San Gabriel	Veracruz
47	San José de Abajo	Veracruz
48	San Miguel El Naranjo	San Luis Potosí
49	San Miguelito	Veracruz
50	San Nicolás	Veracruz
51	San Pedro	Veracruz
53	Santa Clara	Michoacán
54	Santa Rosalía	Tabasco
56	Tamazula	Jalisco
57	Tres Valles	Veracruz
58	Zapoapita	Veracruz

La correcta y oportuna aplicación de fertilizantes es una práctica agrícola que brinda una mejor expectativa sobre la calidad y cantidad de los productos a cosechar; sin embargo, si no se realiza eficientemente afectará de manera negativa a la producción y a los ingresos del productor. Por ello y con el propósito de que el manejo de la fertilización tenga el efecto esperado, primero se debe contar con una estrategia para detectar y delimitar las variables que afecten tanto al cultivo como a la disponibilidad de los nutrientes (condiciones extremas de acidez o alcalinidad, presencia tóxica de sales solubles u otros elementos químicos, compactación del terreno, áreas con drenaje impedido, entre otros) y proponer en su caso alternativas de solución, porque de lo contrario los nutrientes aplicados tendrán poco o ningún efecto sobre la productividad de las plantaciones.

En este orden de ideas y como una primera aproximación, en este documento se presenta un resumen ampliado del procedimiento que seguimos y los resultados que obtuvimos respecto al diagnóstico del sistema de producción y generación de las normas de fertilización para la caña de azúcar, así como las enmiendas que se proponen para mejorar la calidad de los suelos de las áreas de abasto de los ingenios azucareros del país. Cabe mencionar que en la segunda etapa del proyecto se afinarán las recomendaciones de aplicación de insumos considerando el sistema agua-suelo-planta-atmósfera y se brindará la suficiente información para mantener la vigencia de los resultados a largo plazo.

## II. Planeación de la fertilización

La práctica de la fertilización tiene como objetivo primordial aportar aquellos nutrientes esenciales para el cultivo, que el suelo no los provee en la cantidad adecuada y en el tiempo oportuno en que son demandadas durante el ciclo de producción. En condiciones normales, habrá respuesta a la aplicación de fertilizantes cuando la demanda del cultivo sea mayor a la que el suelo pueda aportarle (oferta del suelo). En contraste, si su demanda es satisfecha con la oferta de nutrientes del suelo, la adición de fertilizantes no incrementará la calidad de la producción ni la cantidad de azúcar que se pueda extraer, indistintamente del nutriente que se trate.

Otras causas probables por las que el cultivo no responde a la aplicación de fertilizantes se atribuyen a que no se adiciona la dosis de nutrientes requerida en el momento oportuno, que no sea el insumo apropiado o que existan variables ajenas a la nutrición que restrinjan el desarrollo del cultivo y si este es el caso, la adición de nutrientes no tendrá un impacto favorable sobre la productividad agrícola. Al respecto, cabe reiterar que la aplicación de fertilizantes promoverá un mayor rendimiento y calidad de la cosecha, sólo cuando la disponibilidad de los nutrientes en el suelo sea el factor más restrictivo de la producción; de otra manera su efecto positivo será mínimo o nulo. Por ello, la planeación del manejo de la nutrición y fertilización de las plantaciones de caña de azúcar la llevamos a cabo en varios pasos, mismos que se condujeron para cada una de las áreas de abasto de los distintos ingenios azucareros del país:

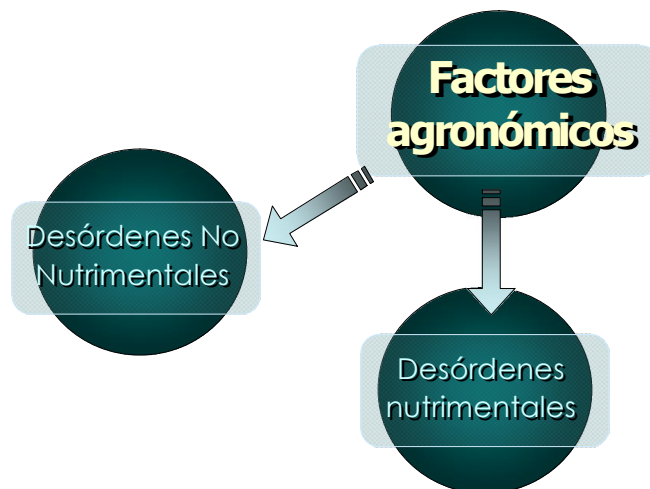
- A. Diagnóstico del sistema de producción:** Definimos los factores que limitan a la producción y algunos procedimientos que se deben considerar antes de fertilizar. Esto se complementará durante la Etapa II del proyecto.
- B. Balance nutrimental:** Se definió en qué terrenos se debe aplicar una serie de nutrientes y cuáles no son necesarios. Esto se precisará con mayor detalle en la Etapa II de este proyecto.
- C. Dosis de fertilizante:** Se planteó como primera aproximación la cantidad de fertilizante a aplicar, la cual se afinará en la Etapa II donde se incluirá las variaciones por el ciclo de las plantaciones.
- D. Manejo de la fertilización:** Se propuso el manejo más apropiado (qué, cuándo, dónde y cómo aplicar el fertilizante). La información se complementará en la Etapa II, donde se incluirá las estrategias de fertilización.



Cualquier método que se emplee para generar recomendaciones de aplicación de fertilizantes parte de dos premisas: a) existe un déficit nutrimental (la demanda es mayor que la oferta de nutrientes) que se corrige a través de la adición de fertilizantes; b) los nutrientes que se liberen de los insumos aplicados serán aprovechados por el cultivo con una determinada eficiencia, la cual depende de la interacción nutriente-suelo-cultivo-ambiente. La diferencia entre los múltiples procedimientos radica en cómo se consideran los parámetros involucrados (demanda del cultivo, oferta del suelo, eficiencia de recuperación de los fertilizantes), lo cual puede hacerse de manera directa o indirecta, explícita o implícita, así como la precisión de su cuantificación. En las siguientes secciones se discute cada parámetro.

### III. Diagnóstico del sistema de producción

Todas las variables consideradas en el manejo forman parte de lo que aquí denominamos "factores agronómicos" y para delimitar los efectos negativos que causan los diversos fenómenos sobre el crecimiento y/o desarrollo de la plantación, los agrupamos de acuerdo al tipo de desorden que inducen en el cultivo (Figura 2).



**Figura 2.** Efecto que causan los diversos fenómenos considerados en los factores agronómicos, que afectan de manera negativa el crecimiento y/o desarrollo de la caña de azúcar.

En el esquema en discusión se muestra la clasificación de los desórdenes que se pueden detectar en las plantaciones con el propósito de hacer un correcto diagnóstico del estado actual del cultivo. Dicho procedimiento evita confundir los efectos de las diferentes variables sobre la productividad y rentabilidad de la caña de azúcar y nos permite estar en condiciones de proponer las alternativas más convenientes que resuelvan una problemática concreta.

Las características químicas (elementos potencialmente tóxicos, alcalinidad, acidez, salinidad) y físicas del suelo (terrenos pedregosos, tipo de pendiente, textura, profundidad, porosidad, entre otras) y las condiciones climáticas (cantidad, intensidad, frecuencia y distribución de la lluvia, temperaturas, vientos, etc.) son variables que al rebasar ciertos límites en magnitud y duración, afectan el crecimiento de la caña de azúcar y modifican la interacción de los nutrientes con los minerales del suelo, disminuyendo la disponibilidad nutrimental y, por ende, la efectividad de la respuesta del cultivo a la aplicación de fertilizantes. Por lo anterior, se hizo una evaluación de las condiciones edáficas y climáticas para que en la medida de lo posible, se superen algunos problemas a través de la aplicación de enmiendas al suelo o cambiando el manejo de la fertilización.

### 3.1 Condiciones climáticas

La disponibilidad de agua es muy importante para la caña de azúcar puesto que los períodos de déficit o exceso, alteran significativamente el rendimiento del cultivo. A su vez, la temperatura influye sobre la tasa fotosintética y por ende en la formación de sacarosa. En la Figura 3 se presenta la fluctuación promedio de la precipitación pluvial total mensual y temperatura (mínima y máxima) en las áreas de abasto de los diferentes ingenios azucareros del país.

La caña de azúcar depende de la tasa fotosintética para la formación de sacarosa, cuya temperatura óptima en la hoja es alrededor de 34°C, pero como intercepta de manera directa la radiación solar, este valor es mayor a la que se registra como temperatura del aire. Por ello, se fija entre 26°C y 30°C como rango óptimo para el crecimiento de la caña. Si durante cierta época del año la temperatura media es menor a 21°C, se retarda el crecimiento de los tallos y aumenta la concentración de sacarosa, lo cual también ocurre si la oscilación entre las temperaturas medias diurnas y nocturnas es mayor a 8°C, siempre y cuando no se presenten factores que limiten el rendimiento.

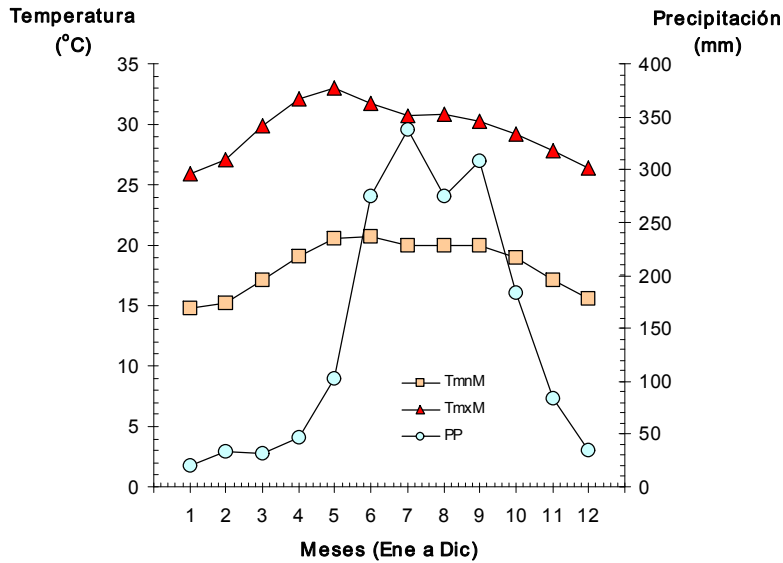


Figura 3. Promedio mensual de la lluvia total y temperatura (mínima y máxima) en las áreas de abasto de los diferentes ingenios azucareros del país.

En el Cuadro 2 se presenta la distribución de frecuencia de diferentes rangos de temperatura mínima y máxima mensual en los ingenios azucareros del país.

Cuadro 2. Distribución de frecuencias de diferentes rangos de temperatura mínima y máxima mensual en los ingenios azucareros del país.

Rango de Temperatura	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sept.	Oct	Nov	Dic
°C												
<b>Porcentaje de la temperatura promedio mínima mensual</b>												
20 a 25	1.4	1.9	5.2	46	68.4	71.4	63.4	65.9	64.5	44.9	7.5	2.3
15 a 20	53.5	60.6	73.7	43.2	24.5	21.1	28.6	26.2	27.6	42.5	71.8	64.5
10 a 15	37.6	31.9	18.3	8.9	5.2	6.1	6.1	6.1	6.1	10.7	17.4	29
5 a 10	5.6	3.8	1.9	1.9	1.9	1.4	1.9	1.8	1.8	1	2.4	2.3
<5	1.9	1.8	0.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.9	0.9	1.9
Σ mensual	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
<b>Porcentaje de la temperatura promedio máxima mensual</b>												
30 a 40	9.9	12.2	55.9	80.8	84	79.8	74.2	77.1	68.7	41.6	13.6	9.8
25 a 30	57.3	67.1	36.6	15	13.7	16	20.2	17.8	26.2	49.1	71.4	64.5
20 a 25	27.7	16.9	5.6	3.3	1.4	3.3	3.8	3.3	3.3	7.5	12.7	22.4
15 a 20	3.8	2.9	1.9	0.9	0.9	0.9	1.8	1.8	1.8	1.8	2.3	1.9
<15	1.3	0.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.4
Σ mensual	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Las áreas de abasto de los distintos ingenios azucareros del país tienen climas muy variados. En 1.9% de los casos observados la temperatura mínima mensual llega incluso a valores menores a 5°C, lo que puede causar daños al cultivo y en situaciones extremas provoca la pérdida total de la producción. Desde luego esto no es generalizable ya que como se puede apreciar en el cuadro en discusión, más de 90% de la temperatura mínima mensual en los ingenios fluctúa entre 10°C y 20°C durante los meses más fríos del año, siendo el rango de temperatura más frecuente entre 15°C y 20°C. En contraste, la temperatura máxima promedio mensual se ubica en el rango de los 20°C y 30°C durante el invierno (diciembre a febrero), lo que aumenta a más de 30°C sobre todo entre abril y septiembre que es el período más caluroso en todas las regiones.

La tasa fotosintética de la caña se incrementa en zonas con mayor concentración de CO<sub>2</sub> atmosférico, aunque este efecto pudiese alterarse por la velocidad del viento y la conductancia estomática, la cual a su vez depende de la intensidad de la luz y las condiciones hídricas en el sistema suelo-planta-atmósfera. De lo anterior se deduce que el proceso fotosintético será más intenso mientras mayor luminosidad haya en toda la planta y que suele ocurrir durante los primeros cinco meses del crecimiento de la caña de azúcar, siempre y cuando no haya restricciones hídricas por déficit o exceso y se cuente con una nutrición apropiada, de lo contrario la producción de biomasa disminuirá y con ello el rendimiento. Cuando todo va bien, durante la etapa de máximo crecimiento puede haber un aumento en los tallos hasta de 2 y 3 cm diarios, según la variedad.

Respecto al período de precipitación pluvial, la distribución de la lluvia es muy similar en todas las áreas de abasto de los ingenios azucareros del país, el cual suele iniciar a partir de mayo y terminar en octubre, ya que durante dicho lapso se capta la mayor parte del volumen de lluvia en el año, mientras que entre noviembre y abril sólo se recibe alrededor del 10% del total anual. La diferencia más bien está en la cantidad de lluvia y su intensidad puesto que hay regiones donde la precipitación pluvial es menor a 700 mm y en contraste, en otras llueve más de 2500 mm, llegando incluso a valores superiores a 3000 mm, en las partes altas (zonas montañosas) del área de influencia de algunos ingenios. En el Cuadro 3 se presenta la distribución de frecuencia de diferentes rangos de precipitación pluvial en los ingenios azucareros del país.

**Cuadro 3.** Distribución de frecuencia de diferentes rangos de precipitación pluvial total mensual en los ingenios azucareros del país.

Rango de lluvia	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sept.	Oct	Nov	Dic
mm												
<b>Porcentaje del promedio de la precipitación pluvial total mensual</b>												
>300	0.0	0.0	0.0	0.0	5.0	35.0	48.0	35.0	55.0	13.0	1.0	1.0
200-300	1.0	0.0	0.0	1.0	1.0	37.0	34.0	39.0	36.0	21.0	4.0	0.0
100-200	3.0	3.0	1.0	5.0	32.0	28.0	17.0	25.0	9.0	41.0	23.0	9.0
50-100	17.0	17.0	20.0	29.0	46.0	0.0	1.0	1.0	0.0	24.0	34.0	35.0
25-50	43.0	33.0	32.0	31.0	15.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	31.0	27.0
<25	36.0	47.0	47.0	34.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	7.0	28.0
<b>Σ mensual</b>	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

Los meses de julio y septiembre suelen ser los meses más lluviosos, con un descenso notorio de la precipitación durante agosto en ciertas regiones. Lo anterior da idea de lo importante que es la planeación de las plantaciones de caña, esto es, sincronizar el crecimiento y desarrollo del cultivo de acuerdo con las condiciones climáticas para que la maduración y cosecha coincidan con el período de estiaje y que las etapas críticas de requerimiento hídrico del cultivo (desde el inicio de la formación de tallos hasta la floración) concuerden con la etapa lluviosa. Si hay un abastecimiento de agua apropiado, ya sea por lluvia o riego, la inducción de la floración se puede relacionar con el fotoperíodo. A partir de la floración se detiene el crecimiento de los tallos y aumenta durante un período breve su concentración de sacarosa; sin embargo, si se prolonga el ciclo de la caña de azúcar después de este momento, disminuirá la calidad de la cosecha por el incremento en su contenido de fibra. En la caña los azúcares se distribuyen por la planta principalmente en forma de sacarosa, así como la glucosa y la fructuosa las cuales se transformarán posteriormente en sacarosa. El flujo de estos compuestos desciende desde las hojas hasta las raíces, para subir nuevamente hacia las hojas y tallos jóvenes. El movimiento descendente es más rápido que el de sentido contrario, lo que propicia una mayor acumulación de sacarosa en los entrenudos y la parte basal del tallo. Por las razones anteriores, se suelen aplicar madurantes para reducir el crecimiento de los tallos pero sin afectar la tasa fotosintética y modificar la actividad de la enzima invertasa ácida para propiciar una mayor acumulación de sacarosa.

La disponibilidad de agua es muy importante para la caña de azúcar, de tal manera que los períodos de déficit o exceso, alteran significativamente el rendimiento del cultivo. Cuando hay estrés hídrico en los últimos dos meses del ciclo, se frena el crecimiento de los tallos y aumenta el contenido de sacarosa, pero bajo condiciones de exceso de humedad (anegamiento) prolongado, el crecimiento se detiene afectando severamente el rendimiento. Por ello y dados los casos frecuentes de anegamiento en las diversas áreas de abasto de los ingenios estudiados, generamos un procedimiento para detectar problemas potenciales de suelos inundados, tomando como variables de entrada los parámetros hídricos (CC y PMP), relación de la proporción entre arena y arcilla, pendiente, reservas orgánicas y concentración de amonio y nitrato.

### 3.2 Condiciones edáficas

Los suelos del área de abasto de los ingenios azucareros son de muy diverso origen y presentan diferencias marcadas en cuanto a sus condiciones físicas y químicas. Para entender la problemática que enfrentamos, se colectaron cerca de 19 mil muestras de suelo y se determinaron alrededor de 400 mil parámetros. En la Figura 4 se presenta como un primer diagnóstico las principales variables detectadas que están asociadas a desórdenes no nutrimentales.



**Figura 4.** Algunas de las principales variables que ocasionan desórdenes no nutrimentales a las plantaciones de caña de azúcar en las áreas de abasto de los ingenios azucareros del país.

Las plantaciones se ubican en distintas posiciones topográficas puesto que los terrenos de cultivo se ubican desde zonas planas hasta con pendientes pronunciadas. La intensidad, frecuencia, distribución y cantidad de la lluvia captada origina diversos problemas cuyo grado de afectación depende de las características de cada suelo (erosión, acidez, acumulación de sales, lixiviación de nutrientes y anegamiento prolongado, entre otros). La variación de algunos indicadores físicos y químicos del ambiente edáfico se muestra en el Cuadro 4, los cuales tienen relación directa o indirecta con la captación de agua en las regiones (lluvia y capacidad de almacenamiento hídrico del suelo).

**Cuadro 4.** Indicadores físicos y químicos de la condición edáfica en las áreas de abasto de los ingenios azucareros del país.

*CE	Frec.	pH	Frec.	*MO	Frec.	*A Int.	Frec.	Arcilla	Frec.	*IRA	Frec.
dS m <sup>-1</sup>	%		%	%	%	cMol kg <sup>-1</sup>	%	%	%	%	%
<1.0	91.3	<4.5	6.5	<1.0	5.5	0.0	65.1	<10	2.2	≤1	77.8
1.0-2.0	5.9	4.6-5.5	16.6	1.0-2.0	17.7	0.01-0.10	11.6	10-20	12.2	2	4.0
2.1-3.0	2.0	5.6-6.5	21.9	2.1-3.0	27.0	0.11-0.20	6.2	21-30	18.7	3	7.2
3.1-5.0	0.7	6.6-7.5	18.6	3.1-5.0	37.2	0.21-0.40	4.4	31-40	20.8	4	6.2
>5.1	0.1	>7.6	36.4	>5.1	12.6	>0.41	12.6	>41	46.0	5	4.9

\*CE= conductividad eléctrica; MO= materia orgánica; A Int.= acidez intercambiable; IRA= Índice del riesgo de tener condiciones de anegamiento prolongado

El pH indica problemas potenciales para la producción de la caña de azúcar, ya sea por presencia de algunos elementos en concentraciones tóxicas como el aluminio, hierro y manganeso en ambientes muy ácidos (pH<5.5) o disminución de la disponibilidad algunos nutrientes en condiciones alcalinas (pH>7.5), como es el caso del hierro, manganeso, zinc y cobre.

En las zonas estudiadas, las áreas con problemas de suelos salinos se localizan en pequeñas regiones en varios de los ingenios azucareros, lo cual es más frecuente en sitios donde predominan terrenos alcalinos y calcáreos. Al respecto, es importante aclarar que la concentración de sales solubles en la solución del suelo, aún no es un factor determinante del rendimiento de la caña de azúcar en la gran mayoría de los predios; sin embargo, hay algunos sitios en que si avanza este problema, se afectará de manera importante la producción de las plantaciones. Entre las causas más probables destaca el tipo de material que formó a los suelos de cada región, las condiciones climáticas, así como el

uso y manejo del agua de riego. Cuando esto no se hace apropiadamente se propicia la acumulación de sales en el perfil, incrementando paulatinamente su presencia, lo que causará diversos efectos nocivos tanto en la absorción de nutrientes como en la capacidad productiva de los suelos (Figura 5).



**Figura 5.** Problemas por alcalinidad o sodicidad en la caña de azúcar

La problemática de los suelos salinos y alcalinos se atenderá durante el desarrollo de la Etapa II del presente proyecto, en la que se propondrá un planteamiento completo del manejo del sistema de producción. En contraste con lo anterior, la acidez del suelo fue la restricción más frecuente que se observó por efecto del ambiente químico edáfico en varios ingenios azucareros (Figura 6).

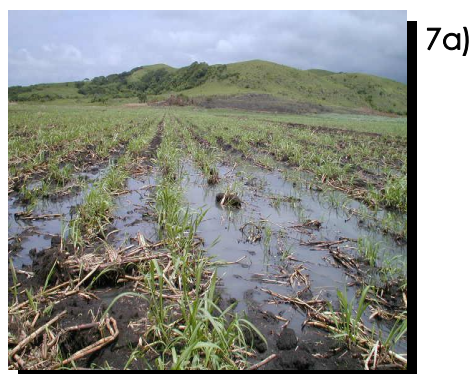


**Figura 6.** Problemas por acidez extrema en el cultivo de la caña de azúcar



Cuando la acidez intercambiable es igual o mayor a  $0.2 \text{ cMol kg}^{-1}$ , se incrementa la probabilidad la presencia de algunas especies iónicas en niveles tóxicos para la caña de azúcar, como es el caso del aluminio, hierro y manganeso. Por lo tanto, en estos casos se justifica la aplicación de cal agrícola para inhibir su disponibilidad. Al respecto, se observó que la concentración del aluminio en el complejo de intercambio puede estar causando daños al cultivo en 17% de los sitios estudiados, lo que ocasiona pérdidas en la productividad de la caña de azúcar. Por ello, en los casos que así lo ameritaron se hicieron las recomendaciones correspondientes para resolver dicha problemática.

Se detectó que alrededor de 18% de los terrenos evaluados son susceptibles a problemas por anegamientos prolongados, lo cual depende desde luego de la frecuencia e intensidad de la precipitación, aunado a condiciones de mal drenaje natural (Figura 7). Cabe señalar que el anegamiento no siempre se presenta en forma de encharcamientos, ya que también el agua puede alojarse en los estratos inferiores del perfil, afectando el desarrollo de la raíz del cultivo. Cuando ocurran problemas de anegamientos superficiales o subsuperficiales deben hacerse obras para drenar los excesos, para evitar pérdidas de nutrientes y mejorar la productividad de las plantaciones de caña de azúcar que estén en dicha situación.

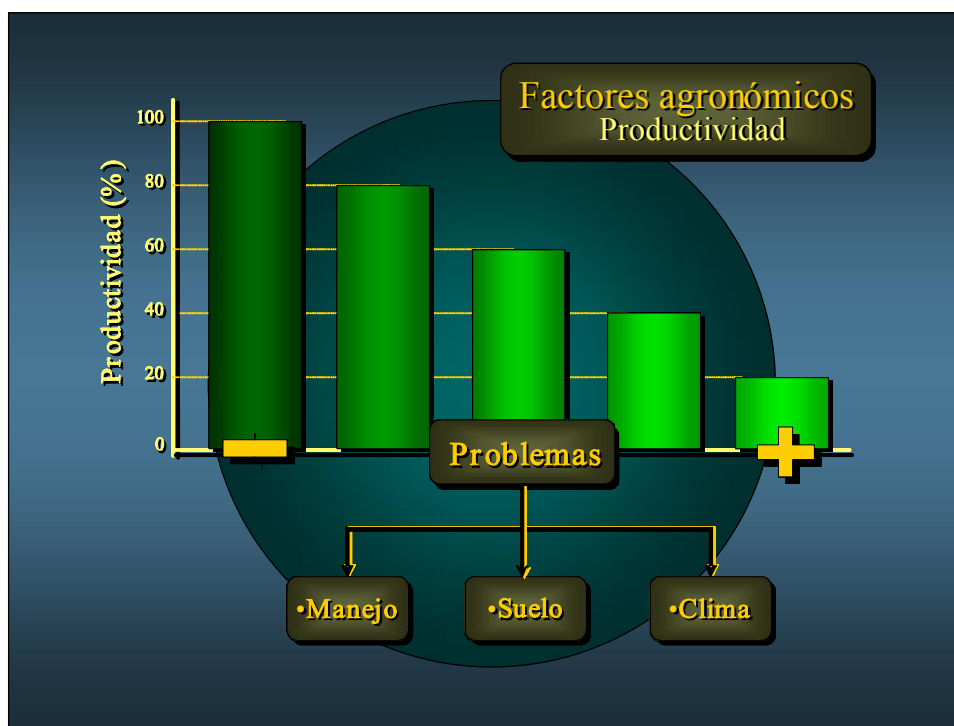


**Figura 7.** Anegamiento prolongado: a) Encharcamientos superficiales; b) pudrición de las raíces por drenaje impedido en la caña de azúcar

En 49% de los suelos estudiados se encontró todavía suficiente cantidad de materia orgánica, lo cual le confiere una serie de condiciones físicas benéficas a los terrenos para la producción de la caña de azúcar, pero si no se tiene el cuidado de preservarla a través de prácticas apropiadas de manejo (aportes de los residuos de cosecha, compostas de los materiales de desecho de la

agroindustria, entre otros), se perderán las reservas orgánicas y con ello la fertilidad física edáfica, lo que originará problemas de compactación, aireación y disminución de la productividad. Esta situación ya se aprecia en más de 20% de los predios evaluados, donde se acentúan problemas en la capacidad de almacenamiento de agua por el suelo y baja productividad de las plantaciones en general.

Cabe reiterar que para potenciar el efecto de la aplicación de fertilizantes sobre la producción de la caña de azúcar, es indispensable atender aquellos problemas que causan desórdenes no nutrimentales (Figura 8).



**Figura 8.** Esquema que resume la relación de las distintas variables que afectan la productividad de las plantaciones en las áreas de abasto de los ingenios azucareros del país.

Las condiciones de suelo, clima y manejo que predominan en las áreas de abasto de los ingenios azucareros del país, alteran la respuesta de la caña de azúcar a la aplicación de fertilizantes y son ajenos a los desórdenes de tipo nutrimental. Por ello, una vez cuantificado su impacto, deben superarse para que la fertilización tenga el efecto esperado para optimizar la productividad y la rentabilidad de las plantaciones de caña de azúcar.

#### IV. El balance nutrimental en el sistema de producción de la caña de azúcar

Una pregunta que se suele hacer de manera recurrente es si se debe fertilizar o no un cultivo. Como el cuestionamiento es concreto y directo amerita una respuesta en el mismo tenor, pero para que esto sea así, como alternativa viable de solución proponemos establecer una relación cuantitativa entre la demanda nutrimental de la planta y la oferta nutrimental del suelo (Figura 9).

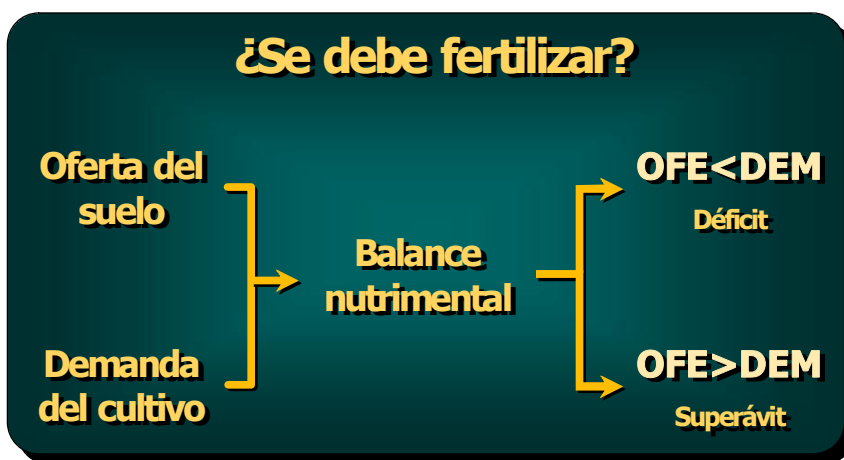


Figura 9. Esquema del balance nutrimental donde se relaciona la oferta nutrimental del suelo con la demanda del cultivo.

La demanda nutrimental ( $D_{EM}$ ) se refiere a la cantidad de nutrientes esenciales que necesita el cultivo para mantener sus funciones metabólicas en óptimas condiciones, indistintamente del medio donde crece (suelo y clima) o el manejo que se practique en el sistema de producción (fertirriego, labranza de conservación, riego, temporal o cualquier otro tipo de práctica agrícola). La  $D_{EM}$  varía directa y proporcionalmente con la meta de rendimiento y la calidad esperada de la cosecha; es decir, mientras más producción se tenga por unidad de superficie, se necesitará mayor cantidad de nutrientes para satisfacer la  $D_{EM}$  que genera la biomasa producida. Es importante tomar en cuenta que la  $D_{EM}$  no es una variable independiente y por lo mismo, no es correcto el planteamiento de que a mayor  $D_{EM}$  habrá más rendimiento y mejorará la calidad de la producción. Esto es, la  $D_{EM}$  está supeditada a la cantidad de biomasa producida, y ésta a su vez depende del efecto que

ejercen sobre ella el suelo, clima y manejo que imperen en el sistema de producción. Si se asigna el valor de la  $D_{EM}$  con base en una meta de rendimiento superior a la que realmente es factible aspirar, se corre el riesgo de aplicar fertilizantes en exceso con efectos adversos como es el causar toxicidad al cultivo, limitar la disponibilidad de otros nutrientes, incrementar de manera innecesaria los costos de producción, provocar daños al ambiente, entre otros.

La oferta nutrimental depende del tipo de suelo, condiciones climáticas e historial de manejo del predio. El suelo es un cuerpo natural susceptible a cambios en sus propiedades sobre el cual crece la vegetación y las plantas cultivadas, el cual está constituido por materiales orgánicos y minerales. Sus propiedades se deben al efecto integrado del clima, de los organismos vivos que en él habitan y de su relieve, donde las prácticas de manejo modifican positiva o negativamente sus cualidades productivas.

Los materiales orgánicos y minerales del suelo contienen nutrientes en formas no disponibles para las plantas. Éstos se liberan en iones aprovechables para los cultivos por diversas reacciones químicas, físicas, fisicoquímicas y biológicas, los que se ubican en la fase líquida del suelo formando una solución de sustancias orgánicas e inorgánicas, de las cuales sólo éstas últimas son absorbidas por las raíces de las plantas, porque las sustancias orgánicas no las aprovechan de manera directa. Todo esto ocurre a una determinada velocidad, la cual varía según el ambiente edáfico (temperatura y humedad) y flujos que se establecen entre los componentes del suelo (biomasa microbiana, reservas orgánicas e inorgánicas tanto activas como pasivas), cuyo aporte total de nutrientes (oferta) dependerá del tipo y cantidad de materiales inorgánicos y orgánicos que lo constituyen. Por lo anterior, el concepto de la fertilidad edáfica se refiere a la capacidad productiva que tiene un suelo, la cual depende de los factores que le dieron origen, del clima y del reciclaje del material orgánico, los cuales se combinan con los minerales confiriéndole una serie de cualidades (fertilidad física) que favorecen el desarrollo de los cultivos. A través de la actividad de los organismos del suelo (fertilidad biológica) y de otros factores, el suelo libera nutrientes y retiene otros elementos químicos nocivos para los cultivos (fertilidad química). Por lo anterior, la oferta de nutrientes es un componente de la fertilidad edáfica, cuya relación con la demanda del cultivo permite diseñar las estrategias de manejo de fertilizantes para proveer aquellos nutrientes que el suelo no aporte en el tiempo y cantidad requeridos por el cultivo. (Figura 10).



Figura 10. Componentes que influyen sobre la interacción de los nutrientes con el suelo y la fluctuación de la oferta nutrimental.

Con la relación cuantitativa entre la demanda nutrimental y la oferta nutrimental establecimos el diagnóstico de la condición nutrimental de cada predio del área de abasto de los distintos ingenios azucareros (Figura 11).

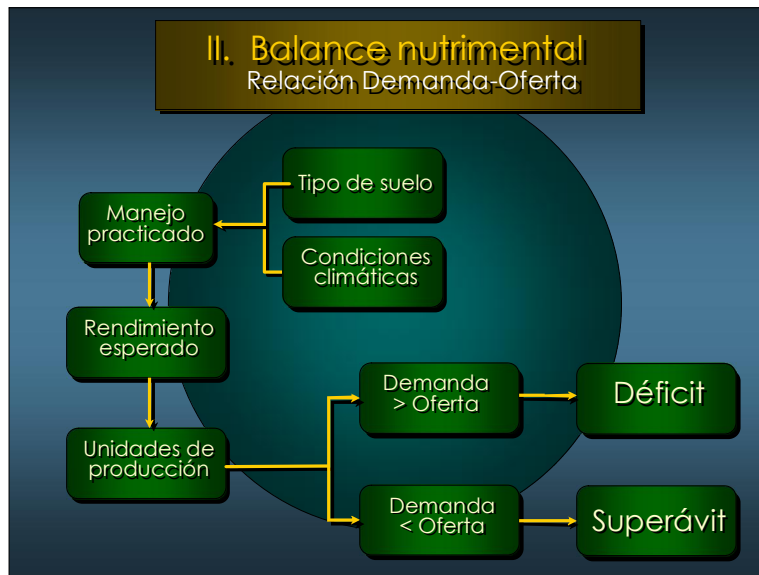


Figura 11. Ruta seguida para evaluar y definir la condición nutrimental de las plantaciones de caña de azúcar en las áreas abasto del país.

Con la cuantificación del balance nutrimental definimos si la oferta del suelo es suficiente como para satisfacer la demanda de la caña de azúcar (a una meta específica de rendimiento) o si se deben corregir los niveles nutrimentales a través de la práctica de la fertilización (Figura 12).

La evaluación de la condición nutrimental decidimos si se necesita o no aplicar fertilizantes, en donde a su vez es indispensable sincronizar los nutrientes a aplicar con la que aprovechan los cultivos y, a la vez considerar la velocidad con que se incrementan o abaten los niveles nutrimentales a través del tiempo en el sistema de producción, con la idea de mantener los nutrientes en un nivel que sea adecuado a largo plazo.

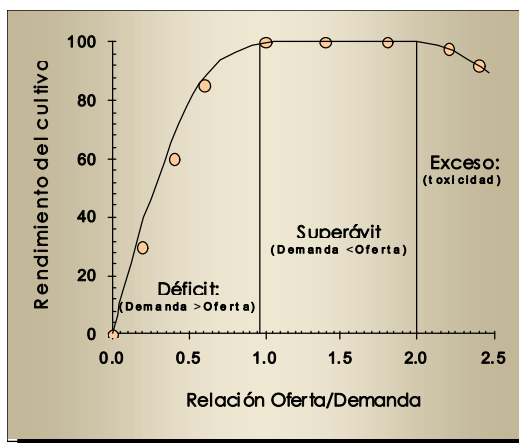


Figura 12. Relación del rendimiento con el cociente oferta/ demanda nutrimental de la caña de azúcar

En otras palabras, con la evaluación cuantitativa de la condición de déficit, superávit o exceso nutrimental, precisamos si es necesario aplicar dosis de corrección, de mantenimiento o si definitivamente no es conveniente aplicar determinado(s) nutriente(s), donde la decisión depende de los cambios que ocurren en los niveles nutrimentales a través del tiempo en el sistema de producción. Por ello, con la dosis de corrección se supera la condición de déficit nutrimental del área de interés para evitar mermar la cantidad y calidad esperada de la producción por problemas nutrimentales, y si se amerita, corregir las prácticas de la fertilización que se han llevado a cabo previamente, mientras que con la de mantenimiento se conserva la oferta en un valor que no ocasione problemas de tipo ambiental y reduzca a su vez los costos por uso de fertilizantes.

#### 4.1 Nitrógeno, fósforo y potasio

El nitrógeno disponible para la planta es el nutriente más complicado de evaluar, porque está sujeto a diversos procesos que influyen en su ruta hacia la solución del suelo (principalmente la mineralización) y fuera de ella (lixiviación,

desnitrificación, volatilización e inmovilización). Por lo anterior, desarrollamos un modelo de simulación para evaluar la oferta de nitrógeno del suelo, cuyas variables de entrada son las reservas orgánicas edáficas (proporción activa de la materia orgánica total), nitrógeno inorgánico, temperatura y humedad del suelo. Con ello tenemos la tasa de mineralización corregida para el ambiente de interés y la predicción de la oferta de nitrógeno, para después compararla con la demanda de la caña de azúcar y tomar la decisión correspondiente sobre la condición nutrimental (déficit, superávit o exceso). En el Cuadro 5 se presenta la cantidad de nitrógeno disponible para la caña de azúcar, en los terrenos muestreados del área de abasto de los distintos ingenios azucareros.

**Cuadro 5.** Distribución de frecuencia de la condición nutrimental del nitrógeno en las áreas de abasto de los ingenios azucareros del país.

Nitrógeno	Frecuencia
kg ha <sup>-1</sup>	%
<10	6.7
10-20	68.5
20-30	14.7
30-50	7.4
>50	2.7

Los principales aportes de nitrógeno provienen de la mineralización de las reservas orgánicas de los suelos y, aunque en algunas zonas pudiesen ser abundantes, no son suficientes por sí mismos como para satisfacer la demanda del cultivo, por lo que la probabilidad de respuesta a la fertilización nitrogenada es alta y muy alta, o en otras palabras, en la gran mayoría de los casos evaluados es indispensable aplicar fertilizantes nitrogenados, para mantener o incluso incrementar la productividad de la caña de azúcar. Las raíces que quedan después de la cosecha constituyen otra fuente de la oferta edáfica de nitrógeno, pero su contribución suele ser muy escasa.

Los tipos de suelo, condiciones topográficas y el régimen climático que predomina en las zonas donde se cultiva la mayoría de la caña de azúcar, apuntan a que las principales pérdidas de nitrógeno del suelo se relacionen con los siguientes aspectos: a) cantidad de nitrógeno en los productos cosechados; b) volatilización del nitrógeno orgánico ocasionado por la quema durante la

zafra; c) desnitrificación. En este último aspecto, en los suelos cuya textura predomina las arcillas, la humedad alojada en los micrositos del espacio poroso fomenta la actividad de la biomasa microbiana anaerobia y acelera la reducción de los nitratos, transformándose a compuestos gaseosos como óxido nitroso y nitrógeno molecular, por lo que se pierde hacia la atmósfera cuyo proceso se conoce como desnitrificación. En estas condiciones, el nitrógeno inorgánico (nitrato), fluye lentamente a través de la profundidad del perfil del suelo, lo que hace improbable que ocurra la lixiviación a pesar del régimen lluvioso. En terrenos con concentración de arcilla  $\leq 15\%$ , el transporte de los nitratos es más intenso y dicho proceso será más acelerado en la medida en que la arcilla sea aún menor, incrementando considerablemente el riesgo de que se pierdan por lixiviación, lo que eventualmente contaminará los mantos freáticos. Por ello, para disminuir el riesgo de ocasionar este impacto negativo sobre el ambiente, es indispensable aplicar el fertilizante de manera apropiada.

En los predios donde prevalece un ambiente químico ácido, no hay condiciones propicias para que el amonio se transforme a amoníaco, evitando que se pierda el nitrógeno por esta vía (volatilización), pero donde el pH es cercano a la neutralidad o que de plano haya condiciones alcalinas, dicho proceso se intensificará significativamente.

Respecto al fósforo, la evaluación de su disponibilidad se puede hacer con base en el análisis químico del suelo. De acuerdo a la norma oficial mexicana, si el pH es inferior a 7.0, la cantidad de fósforo en el suelo se debe analizar con el método Bray-1 y si es 7.0 o superior, entonces se elige el método Olsen. En todo caso, lo importante no está en la elección del método sino su relación con la capacidad de absorción de fósforo por la planta. En el Cuadro 6 se presenta la cantidad de fósforo disponible para la caña de azúcar, en los terrenos muestreados de las áreas de abasto de los ingenios azucareros del país.

En los terrenos donde el fósforo se detectó en una escasa cantidad, es probable que sea consecuencia de una deficiente aplicación de fertilizantes. Si esto es así el rendimiento de las plantaciones de caña de azúcar se limitará sin que necesariamente se aprecien de manera visual los síntomas de carencias nutrimentales. En contraste, hay predios donde la concentración de fósforo en el suelo fue alta o muy alta, lo cual atribuimos al efecto residual inducido por el historial de fertilización de los terrenos. La reacción del aniones fosfato con los minerales del suelo está gobernada por dos cinéticas, una rápida (adsorción) y



otra lenta (difusión vía intrapartícula), por lo que queda sólo una fracción del nutriente aplicado de forma disponible para el cultivo. Por esta razón, es común que se considere que el fósforo es de baja disponibilidad o incluso de "escasa solubilidad", lo cual ocurre tanto en medio ácido o alcalino.

**Cuadro 6.** Distribución de frecuencia de la condición nutrimental del fósforo en las áreas de abasto de los ingenios azucareros del país.

Fósforo	Frecuencia
kg ha <sup>-1</sup>	%
<5	29.4
5-10	16.2
10-15	9.9
15-30	17.3
>30	27.2

Lo que ocurre realmente es que queda una concentración muy baja en la solución del suelo (<0.3 mg L<sup>-1</sup>), por la adsorción del fosfato en los minerales del ambiente edáfico cuya intensidad depende de diversos factores. En el caso de los suelos ácidos abunda la forma H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub><sup>-</sup> que reacciona con óxidos e hidróxidos de hierro y aluminio, mientras que en los alcalinos predomina la forma HPO<sub>4</sub><sup>2-</sup> que reaccionará con los minerales asociados al calcio, primero como un proceso de adsorción y eventualmente podrá ocurrir la precipitación del compuesto.

Sin importar qué tipo de ión se encuentre presente en la solución del suelo o con qué mineral reaccione, se restringe la cantidad de fósforo que pudiese ser aprovechable por el cultivo. Por ello, la dosis que se aplique debe ser lo suficiente como para superar las reacciones antes comentadas, para que haya respuesta del cultivo. Esto es viable y apropiado por cierto tiempo, pero como los mecanismos de pérdida de fósforo se deben fundamentalmente a la cantidad de este nutriente contenida en los productos cosechados y la erosión, si se mantiene la misma dosis (de corrección) a través de los ciclos, los niveles de fósforo en el suelo se acumularán, cuyo incremento llegará a una condición de superávit o incluso de exceso, esto es, la oferta superará la demanda del cultivo, lo que encarecerá innecesariamente la inversión por concepto de uso de fertilizantes. Como no se produce un equilibrio natural bajo estas condiciones, la magnitud de fósforo en el suelo cada vez será mayor, donde el

exceso no causa problemas fisiológicos a la planta ni interferencias con otros nutrientes (a menos que el suelo sea muy alcalino), por lo que no es posible detectarlo a simple vista. De ahí la importancia de establecer un tope para no extralimitarse en las aplicaciones de fertilizante, porque además de repercutir negativamente sobre la economía del productor, incrementa el riesgo de eutrofizar los cuerpos de agua, originado por el transporte del suelo por erosión y que es depositado sobre los ecosistemas acuáticos.

En relación a la disponibilidad de potasio, se suele extraer con el acetato de amonio a pH 7.0 y concentración 1 N, cuyo valor se asocia con la oferta potásica del suelo; sin embargo, si no se toma en cuenta la cantidad y tipo de arcilla en el terreno de interés, así como la densidad de las raíces del cultivo, la interpretación de los resultados llevará a confusiones importantes y se tomarán decisiones equivocadas. Esto se debe a que la interacción del potasio que se encuentra en la solución del suelo con el de los sitios de intercambio está fuertemente influida por la matriz arcillosa edáfica. Por ejemplo, si dos suelos tienen la misma cantidad de potasio intercambiable, pero uno es arenoso (<10% de arcilla) y el otro arcilloso ( $\geq 35\%$  de arcilla), la disponibilidad efectiva de potasio será muy distinta en ambos casos. Lo mismo ocurrirá entre suelos con la misma cantidad de arcilla y potasio intercambiable, pero que en un caso predominen minerales del tipo 1:1 y en el otro arcillas 2:1. Por lo anterior, para una correcta evaluación e interpretación de la disponibilidad de potasio para la caña de azúcar, se debe considerar la eficiencia con la que las raíces del cultivo aprovechan el potasio en diferentes tipos de suelos y después, comparar este valor con la demanda nutrimental de la caña para determinar si hay una condición de déficit, superávit o exceso.

En el Cuadro 7 se presenta la cantidad de potasio disponible para la caña de azúcar en los terrenos muestreados en las áreas de abasto de los ingenios azucareros del país. En condiciones naturales (no agrícolas), se espera que haya una abundante cantidad de potasio en suelos arcillosos, sobre todo en aquellos donde predominen arcillas del tipo 2:1 (caso de los Vertisoles o con características vérticas), en contraste a lo que suele haber en los suelos de texturas arenosas o con otro tipo de arcillas diferentes a las 2:1 (caso de las 1:1, sesquióxidos y óxidos de hierro y aluminio, alofanos, entre otras); sin embargo, esto no es una regla general en terrenos cultivados, ya que la variación del

potasio también cambia por las prácticas de manejo, la cantidad extraída por el cultivo y que salen del terreno a través de los productos cosechados, fertilización, entre otros.

**Cuadro 7.** Distribución de frecuencia de la condición nutrimental del potasio en las áreas de abasto de los ingenios azucareros del país.

Fósforo	Frecuencia
kg ha <sup>-1</sup>	%
<40	0.2
40-80	6.2
80-120	12.3
120-160	7.4
>160	74.0

El potasio prácticamente no se mueve cuando se trata de suelos arcillosos, porque rápidamente es adsorbido en el complejo de intercambio e impide su desplazamiento hacia las partes inferiores del perfil del suelo. Además, como no se pierde por volatilización durante las quemadas provocadas en las zafras, el potasio contenido en la biomasa remanente después de la cosecha se reintegrará al suelo. Entonces, las vías por las que sale este nutriente del suelo son básicamente dos: a) la cantidad de potasio contenida en los productos cosechados y; b) las pérdidas que se producen por la erosión del suelo. Una causa adicional por la que se puede perder el potasio ocurre en los terrenos arenosos, donde se incrementa considerablemente el riesgo de que se lixivie.

#### 4.2 Nutrientes secundarios y elementos menores

En el Cuadro 8 se presenta la distribución de frecuencia de la condición nutrimental del calcio y magnesio en donde se incluye cada uno de los predios evaluados en las áreas de abasto de los distintos ingenios azucareros del país. En la gran mayoría de los terrenos evaluados, los nutrientes secundarios se encuentran en una condición de superávit. Sólo en algunos casos puntuales se detectaron valores cercanos o incluso inferiores a los valores identificados como déficit nutrimental. En el caso del calcio el problema no radica en su posible baja concentración, sino en el medio extremadamente ácido, que provoca toxicidad por presencia de aluminio o incluso hierro y manganeso.

**Cuadro 8.** Distribución de frecuencia de la condición nutrimental de elementos secundarios de las áreas de abasto de los distintos ingenios azucareros del país.

Calcio	Frecuencia	Magnesio	Frecuencia
mg kg <sup>-1</sup>	%	mg kg <sup>-1</sup>	%
<250	0.2	<50	0.1
250-2500	22.1	50-100	1.1
2,500-5,000	34.7	100-500	33.5
5,000-10,000	33.6	500-1,000	26.6
>10,000	9.4	>1,000	38.7

En los terrenos donde hubo problemas acentuados por acidez extrema, se sugirió la aplicación de enmiendas (cal agrícola), lo cual además de inhibir la disponibilidad de elementos potencialmente tóxicos, disminuye la actividad de los iones hidrógeno e incrementa la presencia de calcio en el complejo de intercambio. Para la situación del magnesio, aunque pudiese ser probable una respuesta a la aplicación de este nutriente en algunos terrenos, es necesario corroborar si vale la pena su adición o no a través del análisis foliar, lo cual se dictaminará al concluir la segunda etapa de este proyecto. En el Cuadro 9 se presenta la distribución de frecuencia de la condición nutrimental del hierro, cobre, zinc y manganeso en la que se incluye cada uno de los predios evaluados en las áreas de abasto de los distintos ingenios azucareros del país.

**Cuadro 9.** Distribución de frecuencia de la condición nutrimental de elementos menores de las áreas de abasto de los distintos ingenios azucareros del país.

Hierro	Frec.	Cobre	Frec.	Zinc	Frec.	Manganeso	Frec.
mg kg <sup>-1</sup>	%	Mg kg <sup>-1</sup>	%	mg kg <sup>-1</sup>	%	mg kg <sup>-1</sup>	%
< 0.5	1.0	< 0.5	40.7	< 0.5	54.7	< 0.5	1.8
0.5-1.0	0.2	0.5-1.0	7.6	0.5-1.0	12.1	0.5-1.0	0.2
1.0-3.0	0.6	1.0-3.0	31.4	1.0-3.0	18.7	1.0-3.0	1.9
3.0-5.0	1.0	3.0-5.0	9.6	3.0-5.0	7.2	3.0-5.0	1.3
>5.0	97.2	>5.0	10.8	>5.0	7.3	>5.0	94.8

La concentración de hierro y manganeso se encontró en superávit en la gran mayoría de los casos, incluso en terrenos con condiciones alcalinas y calcáreas.

No obstante lo anterior, detectamos varios sitios donde pudiese haber respuesta a la aplicación de ambos nutrientes. En contraste, el cobre y zinc se encuentran en niveles identificados como bajos o cercanos a ellos. Al respecto y antes de proceder a realizar alguna medida correctiva, primero es necesario considerar los siguientes aspectos:

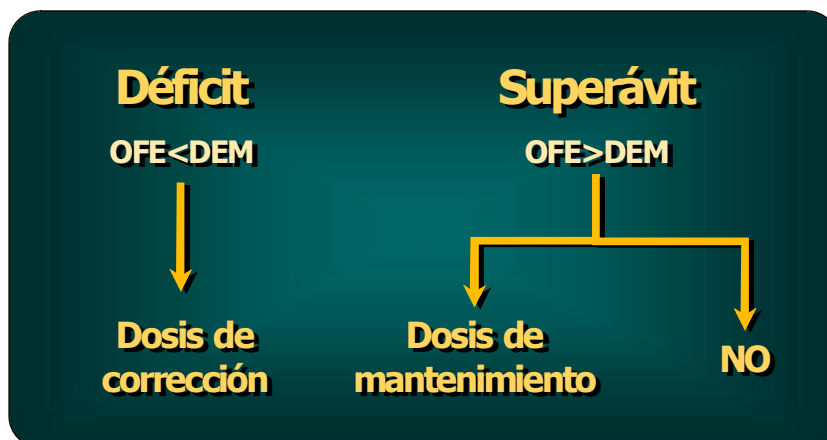
- a) **Evaluar el potencial productivo de la caña de azúcar:** Esto se encuentra en relación directa de la demanda nutrimental, puesto que si es mayor que la oferta, no habrá respuesta a la aplicación del fertilizante
- b) **Estatus de la concentración nutrimental en el tejido vegetal:** Corroborar el diagnóstico inicial a través del análisis foliar
- c) **Condición edáfica:** Evaluar la interacción de las distintas variables que influyen sobre la disponibilidad de los elementos menores de interés, para dictaminar las medidas de corrección o prevención pertinentes.

En otras palabras y de acuerdo con los aspectos comentados previamente, si se pretende implementar un programa para incrementar los rendimientos será necesario evaluar la posible aplicación de elementos menores en algunos terrenos de las áreas de abasto de los ingenios azucareros, haciendo énfasis en cobre y zinc, lo cual se llevará a cabo durante la segunda etapa del presente estudio.

## V. Generación de las dosis de fertilización y recomendaciones de aplicación de fertilizantes

### 5.1 Generación de recomendaciones de fertilización

La probabilidad de que la caña de azúcar responda a la aplicación de fertilizantes depende, entre otras variables, de la relación cuantitativa entre la oferta y la demanda nutrimental. Si la planta exige más nutrientes de las que el suelo le aporta en la cantidad y tiempo requeridos, se produce un déficit el cual debe superarse con la aplicación de fertilizantes y es a lo que denominamos dosis de corrección (Figura 13). En contraste, la dosis de mantenimiento sólo se aplica cuando existe un superávit nutrimental, con la idea de conservar una oferta nutrimental óptima del suelo sin causar problemas de contaminación. Pero si la cantidad de nutrientes en el suelo es aún mayor, entonces no será conveniente fertilizar al menos en el corto plazo.



**Figura 13.** Esquema para decidir qué tipo de manejo es más conveniente hacer de acuerdo a la condición nutrimental en el sistema de producción.

Para precisar adecuadamente la dosis de fertilizante, además de cuantificar el balance nutrimental es indispensable hacer lo propio con la eficiencia de recuperación del fertilizante. Con este parámetro se define el porcentaje de los nutrientes contenidos en el fertilizante aplicado y que el cultivo es capaz de aprovechar, o en otras palabras, sólo una porción de los nutrientes en el fertilizante es absorbida por el cultivo, mientras que el resto seguirá dos rutas: a) los nutrientes reaccionarán con los componentes del suelo quedando en formas no aprovechables, aunque al cabo del tiempo se liberen y queden nuevamente disponibles, denominándose a esto "efecto residual"; b) si por algún mecanismo o reacción los nutrientes aplicados no son retenidos en los componentes del suelo y no los llega a absorber el cultivo, estarán sujetos a diversos procesos de pérdida.

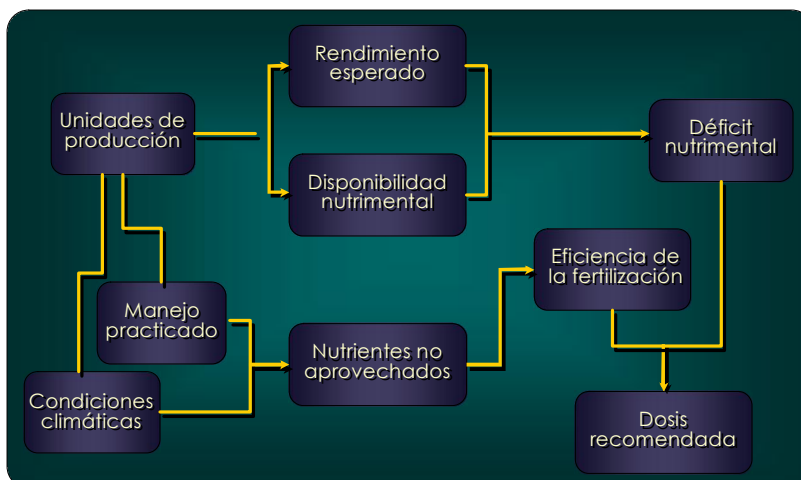
La eficiencia de la fertilización no es constante y su variación depende del tipo de nutriente, puesto que los distintos elementos (y sus formas químicas) presentan reacciones específicas con los diversos componentes del suelo, cuya intensidad se modifica por varias causas (fuente empleada para aportar los nutrientes, método de aplicación, oferta nutrimental, humedad y temperatura del suelo, entre otras). De hecho, en algunos casos la eficiencia puede ser del 10% o menos, lo cual suele ocurrir en la fertilización fosfatada en suelos muy reactivos, mientras que en la fertilización potásica llega incluso a 90% en suelos poco reactivos. Ambos ejemplos son reales y no es posible incrementar dichos

valores de manera significativa, pero si no se hace un manejo apropiado de la fertilización, sin lugar a dudas la eficiencia será mucho menor a la esperada.

Para el caso del nitrógeno una eficiencia del 50% puede ser considerada como razonable, desde el punto de vista ecológico y económico en la mayoría de las zonas de abasto de los ingenios azucareros del país. Como ejemplo, si se aplican  $100 \text{ kg ha}^{-1}$  de nitrógeno, la caña aprovechará  $50 \text{ kg ha}^{-1}$  y de la cantidad restante ( $50 \text{ kg ha}^{-1}$ ) sólo se perderán  $10 \text{ kg ha}^{-1}$  por alguna de las vías de salida del sistema (por ejemplo lixiviación o desnitrificación), puesto que del nitrógeno remanente ( $40 \text{ kgN ha}^{-1}$ ) quedará fijado en las raíces o en formas orgánicas no asimilables por el cultivo al menos de manera temporal, las cuales posteriormente incrementarán la oferta de nitrógeno para el siguiente ciclo (efecto residual), aunque también es viable que queden a merced de los procesos de pérdida ya comentados.

Lo que sin duda ocurre es que si no se aplica el fertilizante en tiempo y forma de manera correcta y oportuna, se intensificarán los procesos de pérdida hacia la atmósfera (reducciones a formas gaseosas como óxido nitroso, amoniaco,  $\text{N}_2$ ,) o a los cuerpos de agua superficiales o subterráneos (principalmente como nitratos), con la consecuente disminución de la eficiencia de la fertilización. Una forma de atenuar el problema anterior es incrementar la dosis para satisfacer la demanda del cultivo, pero esta forma de proceder no es conveniente porque resulta costoso para el productor y daña el ambiente, lo más apropiado es detectar cuál es el origen del problema y resolverlo, para incrementar la eficiencia de la fertilización y aplicar sólo lo que se necesita, disminuyendo tanto los costos como los riesgos de contaminación.

Considerando el nivel de producción actual de la caña de azúcar y meta de rendimiento, condición climática, características del suelo, balance nutrimental y eficiencia de recuperación del fertilizante, se calcularon las dosis por terreno muestreado en las áreas de abasto de los distintos ingenios azucareros del país. Los diferentes pasos que seguimos para generar las recomendaciones sugeridas se presenta en la Figura 14. Con el procedimiento en comento es factible diseñar estrategias para la aplicación de fertilizantes, esto es, planear las dosis a través del tiempo de acuerdo a la capacidad de inversión del productor, ciclo del cultivo (socas), tipo de suelo y clima, entre otros, lo cual es materia de las actividades que llevaremos a cabo durante la segunda etapa del presente proyecto.



**Figura 14.** Esquema donde se integran los pasos que seguimos para generar las dosis recomendadas para cada uno de los terrenos muestreados de las áreas de abasto de los distintos ingenios azucareros del país.

Entre las ventajas que se adquieren con las estrategias de fertilización, resalta el hecho de que no pierde vigencia la recomendación de manejo en cada caso, donde las dosis se programan a través de los ciclos de cultivo y sin que sea necesario hacer análisis químicos del suelo continuamente, además, al disminuir la dosis por la acumulación de nutrientes (especialmente los inmóviles como es el caso del fósforo y potasio), disminuyen los costos por uso de fertilizantes y por consiguiente se incrementa la rentabilidad del sistema de producción. Por lo tanto, la dosis de fertilizantes no es constante y además debe ser específica por tipo de suelo, clima, ciclo, manejo, metas de rendimiento y calidad de la producción.

## 5.2 Dosis de fertilizantes y manejo de la fertilización

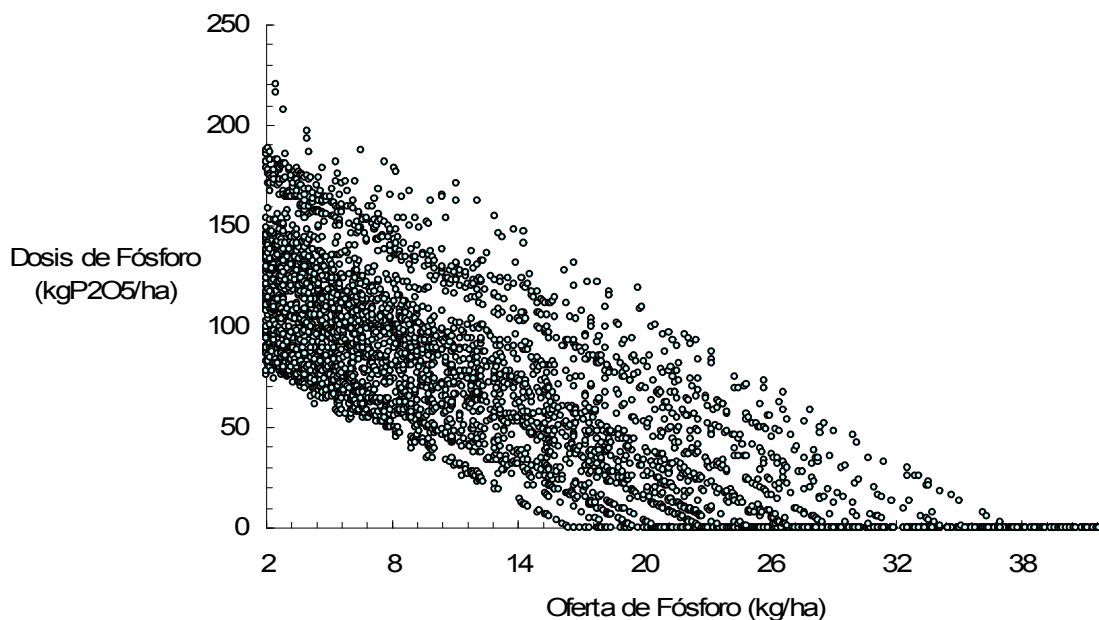
En el Cuadro 10 se presenta la distribución de frecuencia de las dosis de nitrógeno, fósforo y potasio que se recomendaron para cada uno de los terrenos de las áreas de abasto de los distintos ingenios azucareros del país. La tendencia de la dosis recomendada está en el sentido inverso a la oferta de nutrientes por el suelo, lo cual pudiese ser obvio hasta cierto punto; sin embargo, es importante recordar que la dosis no depende exclusivamente de la disponibilidad de los nutrientes, lo cual se ejemplifica en la Figura 15, empleando el caso de la variación observada de la dosis de fósforo.



**Cuadro 10.** Distribución de frecuencia de la dosis de nitrógeno, fósforo y potasio recomendada para cada terreno de las áreas de abasto de los distintos ingenios azucareros del país.

Nitrógeno	Frec.	Fósforo	Frec.	Potasio	Frec.
kgN ha <sup>-1</sup>	%	Kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ha <sup>-1</sup>	%	Kg K <sub>2</sub> O ha <sup>-1</sup>	%
< 50	2.5	0	32.5	0	83.6
50-100	25.2	<50	13.7	<50	5.6
100-150	41.8	50-100	28.9	50-100	4.8
150-200	24.0	100-150	21.6	100-150	3.3
>200	6.4	>150	3.4	>150	2.6

Las fluctuaciones en la dosis obedece a que la eficiencia de recuperación del nutriente aplicado no es constante aunque se trate del mismo cultivo (caña de azúcar en este caso), ya que dicho parámetro está condicionado por la intensidad de la reacción del nutriente aplicado con los diversos componentes del suelo y catalizado por las condiciones ambientales, lo cual varía en los distintos predios de las áreas de abasto de los ingenios azucareros del país y esto también aplica para el nitrógeno y el potasio



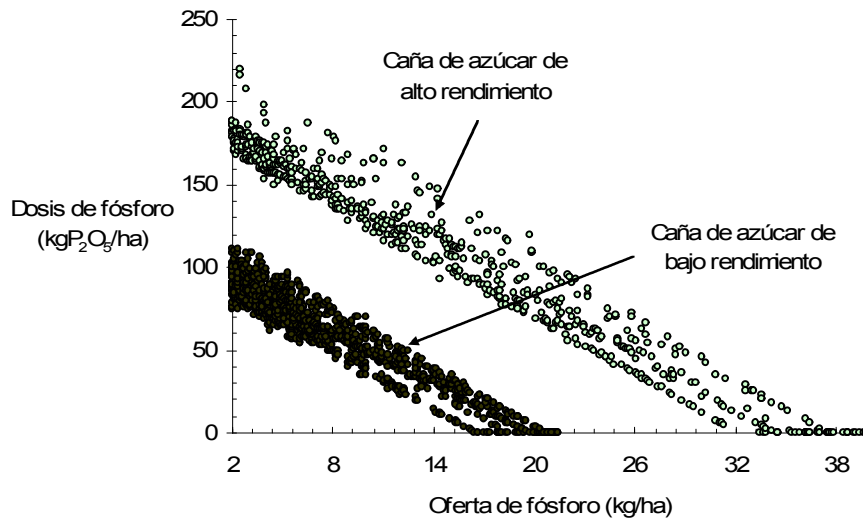
**Figura 15.** Variación de la dosis recomendada de acuerdo a la oferta de fósforo del suelo en algunos de los terrenos muestreados de las áreas de abasto de los distintos ingenios azucareros del país.

La cantidad de nutrientes en el suelo se suele clasificar por categorías como apoyo para decidir la cantidad de fertilizante a aplicar. Sin embargo, la agrupación de la disponibilidad nutrimental no arrojará resultados confiables si esto no se ha calibrado previamente. En el Cuadro 11 se presenta un ejemplo de las variaciones que ocurren al relacionar el nivel de fósforo con la dosis recomendada en distintas áreas de abasto del país.

**Cuadro 11.** Ejemplo de la variación mínima, promedio y máxima de la dosis de fósforo de acuerdo a distintos rangos de oferta de este nutriente por el suelo en algunos terrenos seleccionados de las áreas de abasto de los distintos ingenios azucareros del país.

Oferta de fósforo	Categoría	Dosis de fósforo		
		Mínima	Promedio	Máxima
Kg P ha <sup>-1</sup>		----- kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ha <sup>-1</sup> -----		
<5	Muy Baja	58	123	244
5 a 10	Baja	35	93	187
11 a 15	Media	7	70	171
16 a 20	Alta	16	18	20
>20	Muy Alta	0	1	73

Como se puede apreciar en los datos del cuadro en discusión, para una categoría definida como “muy alta” la probabilidad de respuesta sería a su vez “muy baja”, lo cual es factible para muchos casos; sin embargo, en los sitios donde se tienen rendimientos de caña de azúcar de 140 t ha<sup>-1</sup> o superiores esto no sería así, ya que habría respuesta incluso a ofertas de 30 kgP ha<sup>-1</sup>. En contraste, al analizar la categoría “muy baja” en todos los casos se necesita aplicar fertilizante, pero la variación fluctúa entre 58 y 244 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup>, lo cual es consecuencia tanto del rendimiento esperado como de la eficiencia de la fertilización. Siguiendo con el ejemplo anterior, pero ahora agrupando los datos por la meta de rendimiento de la caña de azúcar, entonces tendremos que la tendencia de la relación entre la cantidad de fósforo disponible (oferta del suelo) y la dosis a aplicar es mucho más evidente, lo cual se presenta en la Figura 16.



**Figura 16.** Ejemplo de la variación de la dosis recomendada de acuerdo a la oferta de fósforo del suelo agrupando los datos por meta de rendimiento de la caña de azúcar en algunos de los terrenos muestreados de las áreas de abasto de los distintos ingenios azucareros del país.

Aunque en esta figura ya se aprecia la fluctuación inversa y proporcional que se espera entre la dosis y la oferta nutrimental, la eficiencia de recuperación del fertilizante ocasiona diferencias a un mismo nivel de nutriente en el suelo, lo cual no es despreciable desde el punto de vista económico.

Las fluctuaciones en el rendimiento de la caña se relacionaron en muchos casos con la cantidad de agua disponible (en riego o temporal). Esta diferencia en productividad necesariamente originará una respuesta distinta del cultivo a la aplicación de fertilizantes. De hecho, dentro de los factores ambientales, las variables relacionadas con la condición hídrica de los sistemas de producción (distribución, frecuencia e intensidad de la lluvia, almacén de agua por el suelo, entre otros), son las que más influyeron sobre la productividad de los cultivos. Esto mismo ocurre se riegue o no, porque la capacidad de almacenamiento de agua por el suelo influye sobre el aprovechamiento del recurso hídrico por la planta, lo cual depende de las fases físicas y químicas del suelo, ubicación del terreno, manejo de las reservas orgánicas edáficas, entre otros. Por lo tanto, habrá mayor respuesta a la fertilización cuando la distribución de agua sea mejor, en comparación con los sitios que sólo dependen de las lluvias o con un almacén hídrico deficiente, aunque se trate de parcelas irrigadas.

Cuando la oferta del suelo satisface plenamente la demanda del cultivo, no ocurrirán desórdenes de tipo nutrimental sin importar el nutriente que se trate. Esto ocurrió con el potasio, cuya situación es común entrar en controversias por las funciones que tiene en el interior de la planta. Al respecto, en más de 80% de los terrenos evaluados en las áreas de abasto de los ingenios azucareros del país, la cantidad de potasio disponible en el suelo basta para que no sea necesario fertilizar con este nutriente y por ello no se recomienda hacerlo en estos casos, independientemente del nivel de rendimiento que se tenga (*Cf.* Cuadro 10). Aunque los procesos que inducen la salida del potasio del sistema de producción pueden no ser significativos, sin duda alguna su nivel se abatirá a través del tiempo si no se toma la precaución de reponerla mediante la adición de materiales fertilizantes, ya sean químicos u orgánicos, por lo que resalta una vez más la importancia de planear la fertilización, lo cual se abordará durante la segunda etapa de este proyecto. Esto es particularmente importante en suelos arcillosos, debido a que superar una deficiencia de potasio en estos casos será más costoso en comparación a la que ocurra en suelos arenosos, ya que la interacción entre el potasio y la fracción fina edáfica modifica la eficiencia de su recuperación.

Una vez resuelta la cantidad de nutriente que se debe aplicar a través del uso de fertilizantes, es fundamental saber cómo proceder para evitar costos innecesarios y optimizar la eficiencia de la fertilización. En este orden de ideas, el manejo de la fertilización está integrado por distintos factores, entre los que destacan los siguientes:

- a) Selección de los insumos más convenientes por tipo de suelo, clima y características del manejo como es el sistema de labranza, condición hídrica (riego o temporal), ciclo de producción (plantilla o socas), entre otros;
- b) Método de aplicación del fertilizante (en banda, al voleo, incorporación, puesto sobre la superficie del terreno, entre otros);
- c) Forma de aplicación de los nutrientes (orgánica o química) ya sea en su presentación líquida, gaseosa o sólida (gránulos o polvos), aplicados directamente al suelo o a través del agua de riego (fertirriego), por medio de mezclas físicas, complejos o fertilizantes simples, entre otros;
- d) Oportunidad de la aplicación, esto es, si se adiciona todo antes o durante la siembra o se debe aplicar en distintas proporciones durante el ciclo de crecimiento del cultivo.

En otras palabras, no es suficiente conocer la dosis de fertilizante que debe aplicarse, además se debe saber qué, cómo, dónde y cuándo aplicarlo para optimizar la eficiencia de la fertilización, ya que mientras ésta sea más baja, la dosis tendrá que ser mayor para superar la condición de déficit nutrimental.

Para el caso del nitrógeno se sugiere parcializar la dosis al menos en dos oportunidades, esto es, una parte de la dosis al momento de la siembra o inicio del rebrote de la caña y el resto adicionarlo durante la primera labor del cultivo. La idea es evitar que el agua de riego o lluvia desplace al nitrógeno más allá de la zona de exploración de las raíces (proceso conocido como lixiviación), lo que produce pérdidas de este nutriente y contamina los mantos freáticos. La velocidad con la que se mueve el nitrógeno (en forma de nitrato) en suelos arcillosos es mucho más lenta y la probabilidad que se lixivie es menor, por lo que en estos casos puede aplicarse toda la dosis desde la siembra; sin embargo, para evitar daños por excesos de sales (causadas por el fertilizante aplicado), también se sugiere parcializar la dosis, sobre todo cuando se aplican cantidades mayores a  $200 \text{ kg N ha}^{-1}$ . Otro aspecto importante en el manejo de la fertilización nitrogenada es no dejar el fertilizante expuesto sobre la superficie del suelo, sobre todo si se tienen terrenos con pendientes pronunciadas o donde haya escurrimientos, puesto que se acarreará con las avenidas causadas por las lluvias y se perderá el fertilizante.

La elección de las fuentes de nitrógeno que se pueden emplear depende básicamente del tipo de fertilizantes disponibles en cada región y de su costo. Cabe mencionar que cualquiera de ellos que libere amonio tendrá un efecto residual ácido (sulfato de amonio, urea, nitrato de amonio, entre otros). Sin embargo, no se sugiere que por esta razón se prefieran aquellas que sólo tengan nitratos, puesto que aunque se trate de terrenos con problemas de acidez, esto se resuelve con el encalado. En los sitios donde el suelo sea neutro o alcalino, se incrementa el riesgo de volatilización del nitrógeno por la transformación del amonio al gas amoniaco cuando se emplean materiales con amonio. Esto se evita o disminuye considerablemente si el fertilizante se entierra y entra en contacto directo con la humedad, pero si se llega a dejar expuesto sobre la superficie del terreno, al humedecerse se tendrán pérdidas significativas de nitrógeno.

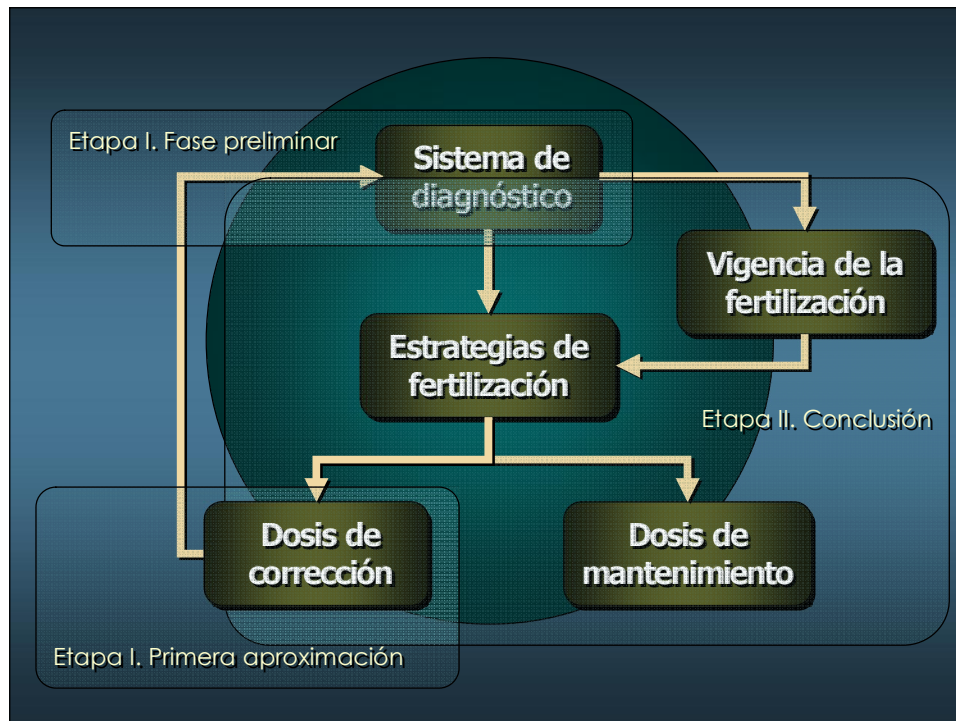
Respecto al fósforo, debe ser incorporado al suelo totalmente al momento de la siembra o inicio del rebrote de la caña durante las socas. No tendrá ningún

efecto positivo si esto se hace ya avanzado el ciclo del cultivo o si se deja el fertilizante sobre la superficie del terreno. El fósforo en el subsuelo prácticamente no se mueve y, por lo mismo, debe procurarse que quede cercano a la raíz del cultivo. Dadas las condiciones climáticas, edáficas y de manejo, se puede emplear como fuente de fósforo cualquier fertilizante sólido soluble (fosfato diamónico o monoamónico, superfosfato triple o simple, mezclas físicas, entre otras), por lo que el criterio de selección debe estar de acuerdo con la disponibilidad de insumos en la región y su costo, siempre y cuando se sigan las sugerencias de su aplicación aquí presentadas.

En lo que se refiere al potasio, se sugiere aplicarlo igual que el fósforo, esto es, enterrarlo todo al momento de la siembra o inicio del rebrote de la caña durante las socas, procurando que quede cercano a la raíz del cultivo a menos que se tengan suelos muy arenosos (<10% de arcilla). Si este es el caso, entonces se debe aplicar el potasio de la misma forma que el nitrógeno. La fuente de potasio que se sugiere es el cloruro de potasio. No es necesario aplicar otras fuentes (sulfato o nitrato de potasio), a menos que se justifique por su disponibilidad en la región y precio por unidad de nutriente en el fertilizante.

## VI. Conclusiones

En el presente documento se hace un resumen de los trabajos realizados durante la Etapa I del proyecto, el cual consistió Los avances obtenidos durante la primera etapa nos permitieron definir desde un punto de vista técnico, los principales factores ambientales (suelo y clima) que limitan el rendimiento de la caña de azúcar y que condicionan la respuesta del cultivo a la aplicación de fertilizantes. A su vez y sólo como una primera aproximación, se proponen dosis de corrección de nitrógeno, fósforo y potasio para los terrenos de las áreas de abasto de los ingenios azucareros del país, puesto que no se consideró de manera directa y explícita las variaciones de la demanda nutrimental por variedad y ciclo (plantilla o socas), lo cual es indispensable tomar en cuenta para no subestimar o sobrestimar las dosis. En la Figura 17 se presenta el plan de actividades realizadas en la Etapa I, así como las que se tienen programadas durante la Etapa II de este proyecto.



**Figura 17.** Esquema que resume los estudios realizados en el presente proyecto, así como los que se llevarán a cabo durante la segunda etapa para generar las recomendaciones de fertilización en las áreas de abasto de los distintos ingenios azucareros del país.

Durante la Etapa II del proyecto se complementará el sistema de diagnóstico para las plantaciones de caña de azúcar, en el que se incluirá la aplicación y manejo de enmiendas para suelos ácidos, salinos y alcalinos, incrementar o mantener las reservas orgánicas edáficas, mejorar la capacidad de almacén de agua por el suelo, entre otros aspectos. También se tiene contemplado precisar el manejo de la fertilización para nutrientes secundarios (azufre) y menores (hierro, manganeso, cobre, zinc y boro) y la modificación de las dosis para nitrógeno, fósforo y potasio de acuerdo al tipo de variedad y ciclo del cultivo. Los aspectos anteriores nos permitirán finalmente diseñar estrategias de fertilización para mantener vigentes las recomendaciones, lo que permitirá abatir los costos de producción en lo referente al uso de fertilizantes, disminuir al máximo posible el riesgo de contaminación ambiental por efecto del manejo agronómico de las plantaciones de caña de azúcar y en la medida de lo posible incrementar su productividad.