MEMORIA

Fertilidad de Suelos y Manejo de la Nutrición de Cultivos en Costa Rica

Editores: Gloria Meléndez y Eloy Molina

AGOSTO 2001

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA
CENTRO DE INVESTIGACIONES AGRONÓMICAS
LABORATORIO DE SUELOS Y FOLIARES

FERTILIDAD DE SUELOS Y MANEJO DE LA NUTRICIÓN DE LOS CULTIVOS EN COSTA RICA

Dr. Alfredo Alvarado Hernández
Centro de Investigaciones Agronómicas
Universidad de Costa Rica
Alfreoa@cariari.ucr.ac.cr

Ing. Floria Bertsch Hernández M.Sc.
Centro de Investigaciones Agronómicas
Universidad de Costa Rica
fbertsch@cariari.ucr.ac.cr

Ing. Norberto Durán
Palmatica S.A.
coto@numar.net

Dr. Marco V. Gutiérrez
Estación Experimental Fabio Baudrit
Universidad de Costa Rica
marcogs@racsa.co.cr

Ing. Walter Herrera
Consultor en Suelos y Nutrición

Ing. Eloy Molina Rojas M.Sc.
Centro de Investigaciones Agronómicas
Universidad de Costa Rica
eamolina@cariari.ucr.ac.cr

Ing. Freddy Sancho Mora M.Sc.
Centro de Investigaciones Agronómicas
Universidad de Costa Rica
fsancho@cia.ucr.ac.cr

Ing. Gabriela Soto M.Sc.
Centro Agronómico de Investigación y Enseñanza (CATIE)
gabisoto@catie.ac.cr

Ing. Carlos Flores
Consultor en Suelos y Nutrición, QUIFA S.A.
floressibaja@hotmail.com

Dr. Rafael Salas
Centro de Investigaciones Agronómicas
Universidad de Costa Rica
resalas@cariari.ucr.ac.cr

Ing. José H. Rodríguez
Consultor Privado, Rodvan DV
josehrm@racsa.co.cr

INDICE

CONTENIDO	Pág.
PROBLEMAS DE FERTILIDAD EN SUELOS DE COSTA RICA **Floria Berstch**	**1**
MANEJO DE SUELOS DERIVADOS DE CENIZAS VOLCÁNICAS **Alfredo Alvarado**	**11**
MANEJO DE LA ACIDEZ Y ENCALADO DE LOS SUELOS **Eloy Molina**	**27**
LA IMPORTANCIA DE LA RAÍZ EN LA NUTRICIÓN MINERAL DE LAS PLANTAS **Marco V. Gutiérrez**	**41**
ABONOS ORGANICOS: PRODUCCIÓN Y USO DE COMPOST **Gabriela Soto**	**45**
APLICACIONES DE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRAFICA EN ESTUDIOS DE LA FERTILIDAD DE LOS SUELOS **Freddy Sancho**	**64**
MANEJO DE SUELOS Y FERTILIZACIÓN DE CAFÉ **Eloy Molina**	**76**
MANEJO DE SUELOS Y FERTILIZACIÓN DE ARROZ **José H. Rodríguez**	**89**
MANEJO DE SUELOS Y FERTILIZACIÓN DEL CULTIVO DE PIÑA **Walter Herrera**	**102**
MANEJO DE SUELOS Y FERTILIZACIÓN DE CAÑA DE AZUCAR **Rafael Salas**	**109**
MANEJO DE SUELOS Y FERTILIZACIÓN DE PALMA ACEITERA **Norberto Duran**	**119**
MANEJO DE SUELOS Y FERTILIZACIÓN DEL CULTIVO DE BANANO **Carlos Flores**	**132**

PROBLEMAS DE FERTILIDAD DE SUELOS DE COSTA RICA

Floria Bertsch

1. ALGUNAS CONSIDERACIONES IMPORTANTES SOBRE FERTILIDAD DE SUELOS

Dado que el objetivo que se persigue es identificar y enumerar problemas, resulta muy conveniente comenzar recordando la Ley de Liebig. Este concepto del barril que se refiere al ordenamiento de los factores limitantes, y la importancia de resolverlos según esa secuencia, es un modelo que continúa siendo de gran aplicabilidad en la evaluación y manejo de la fertilidad de los suelos.

Por otro lado, la concepción del término fertilidad ha ido modificándose con el tiempo y en la actualidad más se acerca al concepto de productividad que a otra cosa. O sea, lo que ofrece potencialidad nutricional a un suelo no es sólo su contenido de nutrientes, sino todos aquellos factores tanto químicos como físicos y biológicos que influyen sobre la disponibilidad y accesibilidad de los nutrientes por la planta.

Si se tratara de aplicar la mencionada Ley de Liebig en busca de ordenar y priorizar los factores que pudieran considerarse problemáticos al evaluar la situación de fertilidad en el país, quizá el primer problema que se identifica es la falta de conceptualización, por parte de los agrónomos y los agricultores, del SUELO como un SISTEMA.

Esa idea básica de que el SUELO, como componente del sistema de producción suelo-planta-clima-manejo es a su vez un sistema por sí mismo, y que por lo tanto funciona como una unidad, en respuesta a la interacción directa de todos sus componentes, se desdeña con demasiada facilidad.

Dicho de otra manera, con relativa frecuencia se olvida que el secreto para lograr la expresión concreta de toda la potencialidad de un suelo radica en contribuir a la acción articulada de cada uno de sus fracciones particulares. O sea, hay que conocer cada uno de esos componentes del suelo y sobretodo, la forma en que están interactuando con el resto para poder, mediante manejo, lograr su mejor expresión.

2. COMPONENTES DEL SISTEMA NUTRICIONAL DEL SUELO

Físicos

De esos componentes del suelo que afectan la potencialidad nutricional de un suelo, los físicos son los que primero saltan a la vista. Siempre se hace referencia a ellos de entrada, pero en realidad se cuantifican tan poco que, rápida y lamentablemente, se dejan de lado.

La que más se mide es la textura, sin embargo, para una identificación de problemas quizá esta característica resulte muy general. Interesa más tener claridad sobre el tipo de coloide predominante en el sistema y su comportamiento.

Tres de las propiedades físicas más relevantes, por su interacción con el aspecto nutricional, son:

- Profundidad de la capa arable,
- Compactación desde el punto de vista de capa dura que dificulta la penetración física de las raíces, e inhibe su desarrollo por falta de oxígeno, y
- Contenido de humedad, en el tanto en que propicia la falta de oxigenación y modifica la disponibilidad de los elementos sensibles a las reacciones REDOX.

Mayor profundidad indudablemente ofrece al cultivo un mayor ámbito de exploración, mejor agarre, y mayor volumen para amortiguar los efectos que el sistema de producción establecido sobre ese suelo está ocasionando sobre el ecosistema.

La compactación es un producto directo del manejo con maquinaria o el tránsito excesivo, y aunque puede ser "manejable", en general con el tiempo conduce a deterioro. Así que, lo primero que habría que hacer es revisar las prácticas de manejo que incluyan maquinaria, valorar su indispensabilidad y reducirlas al mínimo. En el tanto que el sistema de cultivo incluya estos programas regulares de uso de maquinaria o de excesivo tránsito, debe pensarse en su atención regular también (descompactación), para proteger no solo las características físicas del suelo, sino también las nutricionales. Las barreras físicas dificultan la prolongación de las raíces, o sea, la extensión del órgano absorbedor de nutrientes, pero además, aunque la raíz pueda penetrar, si la disponibilidad de oxígeno está reducida, no se produce la absorción, esto es que, desde el punto de vista nutricional, la raíz que se encuentra en un suelo compactado, difícilmente estará cumpliendo su rol absorbente.

El exceso de agua en la zona radical, producida por el mismo efecto de compactación o por rompimiento local de la estructura, incluso en casos extremos, al cavar inadecuadamente un hoyo de siembra, produce el mismo efecto de falta de oxigenación mencionado anteriormente, y por lo tanto, de impedimento a la raíz para respirar y de inhibición de la absorción. A esto se une además, el hecho de que la presencia de condiciones locales reducidas puede conducir a la ocurrencia de reacciones REDOX en los 4 elementos que se ven afectados por ellas: el N, el Fe, Mn y S, con sus respectivos cambios de disponibilidad.

El N, si está como nitrato y se reduce, se desnitrifica y por lo tanto sale en forma gaseosa del sistema. El S forma compuestos sulfhídricos, y se torna no absorbible, y los otros dos, el Fe y el Mn, pueden, bajo condiciones reducidas, aumentar considerablemente sus formas divalentes, que son absorbibles por la planta, y por lo tanto, causar hasta intoxicaciones.

Lo importante de considerar con estos efectos de compactación o inundación localizados producidos por manejos inapropiados, es que pueden producir síntomas nutricionales igualmente localizados y aislados, que bajo condiciones normales no constituirían una distribución esperable de problemas relacionados con nutrición. Por este motivo, para hacer un diagnóstico de este tipo, hay que analizar en detalle las prácticas efectuadas.

Químicos

Desde un enfoque propiamente químico, las limitantes nutricionales que se presentan con más frecuencia, por lo general, pueden asociarse con alguno de estos cuatro aspectos:

- El tipo de sistema coloidal dominante y el conocimiento y comprensión que se tenga del mismo,
- El tipo de elemento del que se trate,
- El tipo de sistema de cultivo que se tenga, y
- El manejo que se le ha efectuado.

Que el coloide dominante sea 2:1, alofana, un material 1:1 o una mezcla de coloides orgánicos, es el factor que introduce las principales diferencias en las potencialidades nutricionales de un suelo. No es lo mismo contar con una superficie específica muy extensa, con carga negativa generada principalmente en sus capas externas por sustitución isomórfica permanente, como es el caso de las Vermiculitas, que tener un material con una gran superficie también, pero altamente amorfo, inestable y cuya carga es mayoritariamente variable, generada por la ionización de OH terminales y que se modifica con los cambios de pH. Por otro lado, suelos ricos en arcillas 1:1, estructuradas como seudoarenas a través de puentes de H, constituyen complejos coloidales con mucha restricción nutricional pues poseen una CICE excesivamente baja. También, que la superficie de retención sea principalmente orgánica y que las reacciones se vean afectadas por toda la acción biológica ligada a esos coloides, indudablemente genera grandes diferencias en la potencialidad nutricional de los suelos.

Cada nutriente tiene propiedades particulares que lo hacen desenvolverse particularmente según sea el sistema coloidal al que se enfrente. Las limitantes que ofrecerá el N en un suelo dominado por materiales caoliníticos serán tremendamente diferentes a las que ofrezca un suelo volcánico, y aún más, si este es manejado con un fuerte componente orgánico, por ejemplo. Igualmente la magnitud de la limitante que representa para el P de un suelo la presencia de alofana, como ocurre en volcánicos, en comparación con la fijación que puede ocurrir por presencia de Ca, como ocurre en Vertisoles, es diametralmente diferente.

También, las limitantes químicas cambiarán según las exigencias que tenga cada cultivo y el grado de intensidad de manejo que tenga el sistema. No será lo mismo la importancia de una deficiencia de Zn en una plantación perenne de mango, por ejemplo, sembrado a 5 x 5 m entre árboles y que produce una vez al año, a la relevancia que tendrá en un cultivo de arroz, inundado, de alta densidad, cosechado dos veces al año. Igualmente, la importancia de un elemento como K en un suelo aluvial será diferente si se evalúa en una plantación de melón (fruta altamente demandante de K), o en un pasto. La relevancia de un problema de N en una plantación convencional de café, con rendimientos esperados de 60 fan/ha, también diferirá en magnitud a la que presenta una plantación manejada orgánicamente con una aspiración de producción de 20-25 fan/ha.

Por último, químicamente, dada la dinámica que caracteriza al sistema suelo, quizá el factor que más repercute en generar nuevas limitantes nutricionales en un suelo dado, lo constituyen las prácticas de manejo nutricional que se ejecuten sobre ese sistema, como pueden ser el encalado, la fertilización, la aplicación de abonos orgánicos, etc. Por ejemplo, el mismo suelo volcánico de las partes altas de la Hacienda Juan Viñas, manejado bajo dos diferentes sistemas de cultivo, a saber, caña en las secciones de menor pendiente y café en las laderas, ha generado, luego de más de 40 años de aplicar paquetes nutricionales específicos para cada cultivo, dos secuencias de limitantes muy diferentes. Mientras que en los suelos cañeros las reservas de bases K, Mg y Ca han disminuido considerablemente, sin que esto implique presencia de problemas de acidez, en los suelos cafetaleros, la fertilización nitrogenada más frecuente a conducido a una acidificación inducida de magnitudes importantes, sin que necesariamente los niveles de Ca hayan bajado demasiado. El Mg sí ha sufrido un decrecimiento importante, pero por el contrario, la regularidad en la aplicación de K ha conducido a acumulaciones importantes. En el caso del P la situación también es contrastante: en caña, por la omisión en la fórmulas convencionales, el nivel de P disponible se ha mantenido por debajo del nivel crítico, mientras que en café, la constancia del elemento en las fórmulas ha ido produciendo una elevación gradual de los niveles por encima del crítico. En ambas situaciones, el Zn ha llegado a ser limitante. De igual manera, en el tanto en que un sistema se introducen ciertas correcciones, son otros los problemas que empiezan a surgir. Si se atiende un problema de K, probablemente con el tiempo se generarán limitantes de Mg o viceversa.

Biológicos

Finalmente, la inclusión del componente biótico como integrante indiscutible, participante activo, e incluso, si se le conoce y se le maneja adecuadamente, como factor determinante de la función nutritiva de un suelo, es definitivamente un avance notable en el estudio de la fertilidad de suelos. En el pasado, aunque se reconocía la relevante participación que dicho componente podría jugar en el suelo, se contaba con tan poca información cuantificable, que en la mayoría de las oportunidades se obviaba su consideración. Actualmente, la información disponible hace inconcebible la omisión de este factor. Dos aspectos del componente biológico que van a ser discutidos a continuación son:

- La rizosfera
- El poder amortiguante y la capacidad almacenadora del componente orgánico

Por rizosfera se entiende esa zona del suelo tan en contacto con la raíz que ya no se puede considerar ni suelo ni raíz dada la fuerte interacción entre ambos componentes. En esta zona ocurren una serie de reacciones químicas producto de las condiciones específicas del sitio, y una actividad particularmente alta de la población microbial.

El otro aspecto de gran relevancia que el componente orgánico introduce en el medio es el aumento en la capacidad amortiguadora. Esto significa que ante cambios en el sistema, la presencia de compuestos orgánicos puede ayudar a aminorar o minimizar los efectos. En términos generales, cualquier exceso en el manejo complica el funcionamiento de un sistema, mientras que la diversidad resulta una herramienta muy útil para enfrentar situaciones problemáticas.

3. GRUPOS DE SUELOS DE COSTA RICA

En términos de fertilidad, los suelos de Costa Rica pueden ubicarse en 5 grupos principales: **Volcánicos** (orden Andisol), **Vertisoles**, **Rojos** (órdenes Alfisol y Ultisol), Suelos de **Montaña** (órdenes Andisol e Inceptisol) y **Aluviales** (órdenes Inceptisol y Entisol). Si se tratara de identificar dentro de éstos, el grupo de suelos que expone mayores limitantes nutricionales, probablemente con facilidad se llegaría a la conclusión de que los Rojos, con su tendencia a la acidez y a la pobreza de bases constituiría ese grupo, sin embargo, estos problemas resultan relativamente fáciles de manejar en comparación con otros, algo más enmascarados como los desequilibrios de bases que presentan los aluviales, que resultan mucho más difíciles de diagnosticar y de solucionar.

En forma general, será de gran ayuda identificar las características relacionadas con nutrición en cada grupo de suelos, las cuales se resumen en el Cuadro 1, sin embargo, al ubicar geográficamente la distribución de estos grupos en las diferentes zonas del país, se puede hilar más fino, y establecer con un mayor nivel de especificidad, los problemas particulares y dominantes en cada zona. Esta información, en términos principalmente de limitantes químicas reflejadas en base de datos de análisis de suelos se presenta en los Cuadros 2.1 y 2.2.

Cuadro 1. Resumen de los aspectos claves en los ciclos de los diferentes nutrimentos. Principales alternativas de manejo en suelos Vertisoles, Volcánicos y Rojos

	VERTISOLES (Vertisol)	VOLCÁNICOS (Andisol)	ROJOS (Ultisol-Alfisol)
CARACTERíSTICAS SUELO			
Sistema coloidal	Al-Si laminares	Oxídico	Oxídico
-carga	Solo negativa presente	Variable	Variable
-intercambio	Catiónico	Catiónico y aniónico	Catiónico y aniónico
-coloide dominante	2:1	Alofana, sesquióxidos	1:1, sesquióxidos
CLIMA			
-regímen humedad	Ûstico	Üdico	Üdico / ústico
-temperatura	alta	Moderada	alta
-distribución lluvia	mala	Regular	regular
-cantidad lluvia	moderada	alta	muy alta
CALCIO, MAGNESIO Y POTASIO			
COMPONENTES			
Fracción cambiable	Alta	Media variable	Baja
-sus. especifica	Alta	Alta	Baja
-acidez	Nula	Puede haber	Alta
-balance Ca-Mg-K	Desbalances	Pueden producirse	Puede darse
fracción nativa	Grande	Variable	Pequeña
(POTASIO)			
Fracción no cambiable	Muy alta	Moderada	Nula
-tipo de coloide	2:1	Alofana	No hay 2:1
PROCESOS			
Intercambio iónico			
-tipo de carga	Fija, negativa	Variable	Variable
-CICE	alta	De moderada a alta	Baja
-CIA	muy baja	Muy alta	Alta
Lixiviación			
-textura	Baja	Media / alta	Muy alta
-tipo de coloide	Fina	Franca	Arcillosa (seudoarenas)
-retención	2:1	Alofana	1:1, R_2O_3
-tamaño de poros	muy alta	Moderada	baja
	muy pequeño	Intermedio	grande
(POTASIO)			
Fijación			
-tipo de coloide			
-clima: estaciones	2:1	En intersticios alofana	no hay 2:1
-regímen	muy marcadas	Poco definidas	pueden ser definidas
	ústico	údico	ústico / údico
MANEJO	-No hay problemas de Ca y Mg -puede ser necesario atender el problema de K por desbalance	-Puede ser necesario fertilizar con Ca y Mg -el encalado sirve para subir la CICE y mejorar la mineralización -pueden inducirse problemas de Mg por fertilizar con mucho K	-Hay gran respuesta al encalado para eliminar Al -si se encala, no descuidar el Mg -puede haber respuesta a Ca y Mg como fertilizante -fraccionar cuando se fertiliza con Ca y Mg
(POTASIO) % de eficiencia	-muy alta fijación por abundancia de 2:1 y regímen ústico definido -puede haber desbalances **60-65%**	-hay lixiviación de K -puede darse fijación "física" en intersticios de alofana **70-80%**	-muy alta lixiviación de K **60-70%**

	VERTISOLES (Vertisol)	VOLCÁNICOS (Andisol)	ROJOS (Ultisol-Alfisol)
	NITRÓGENO		
COMPONENTES Fracción orgánica -deposición -descomposición -suplemento de N	 Baja Alta Alta De moderado a bajo	 Muy alta Alta Baja(oraganominerales) Propiciable (con P o cal)	 Baja Baja Baja Propiciable (con cal)
PROCESOS Condiciones para la vida microbial -suelo -clima	 Adecuadas pH y bases muy altos Estacional	 Moderadas Falta P y hay alofana Údico y poco caliente	 Difíciles Acidez, poco P Muy húmedo y muy caliente
Lixiviación -nitrificación -suelo -clima	Baja Moderada Muy arcilloso, baja permeabilidad Estación seca larga	Moderada / alta Moderada Buena estructura, presencia de CIA Mucha lluvia distribuida	Muy alta Baja Buena estructura, baja actividad coloidal Precipitación exagerada
Desnitrificación Volatilización Fijación de amonio	Muy alta en inundado Muy alta si se aplican amoniacales en seco Muy alta por 2:1	Localizada Poco probable Moderada por alofana	No hay Moderada si se aplica amoniacales en seco Baja por haber 2:1
MANEJO	-Dosis de mantenimiento según necesidad del cultivo y el % de eficiencia -buena respuesta a abonos verdes -uso de coberturas -uso de leguminosas -aprovechar épocas	-Encalar suave para favorecer mineralización -adicionar P para favorecer mineralización -dosis de mantenimiento según necesidad del cultivo y el % de eficiencia -adicionar amoniacales para evitar lavado -para efectos rápidos usar nitratos -uso de coberturas -uso de leguminosas + cal	-Encalar -fraccionar mucho -si se usan amoniacales cuidar la hora del día -usar coberturas de leguminosas -uso de cultivo en callejones -uso de asociaciones -usar leguminosas tolerantes a la acidez
% de eficiencia	-alta volatilización si se usan amoniacales -alta fijación si se usan amoniacales -hay desnitrificación si se siembra inundado y se usan nitratos **50-65%**	-hay lixiviación de nitratos -puede presentarse desnitrificación localizada -la mineralización aporta **55-65%**	-muy alta lixiviación especialmente de nitratos -puede ocurrir lixiviación de amonio **50-55%**

Completar este tipo de cuadros con información física y biológica aportada por la experiencia, será una herramienta bien útil para el dominio general de las condiciones de fertilidad de los suelos del país.

Cuadro 2.1 Limitantes nutricionales específicas identificadas en grupos y zonas de suelos Volcánicos y Vertisoles de Costa Rica

	QUIMICAS	FÍSICAS y BIOLÓGICAS	FORTALEZAS NUTRICIONALES
VOLCÁNICOS		susceptibles a compactación	abundante presencia de organominerales renovación frecuente
Irazú-Turrialba	fácilmente acidificables por manejo	anaerobiosis localizada	niveles de bases más altos
	susceptibles de perder bases	alta actividad de organismos anaeróbicos denitrificantes	P alto por aplicaciones consecutivas
	impactados por efecto residual de amoniacales		B y S de mantenimiento
	P bajo solo en condiciones naturales o en caña		como existe buen P, hay buena respuesta a agricultura orgánica
	bajos niveles de Mg por aplicaciones de K		
	deficientes en Zn		
Poás	niveles bajos de bases		P alto por aplicaciones consecutivas
	deficiencias de B en crucíferas	presencia de lluvias ácidas	niveles medios de bases
	bajos niveles de Mg por aplicaciones de K		buena respuesta a agricultura orgánica
Coto Brus	los más pobres, los más viejos deficientes en P, B, S	poco profundos	
Atlántico	responden a K pueden incrementar su acidez extraíble y empobrecerse por manejo	mal drenados	por deposición aluvial
	deficiencias de Zn	muy susceptibles a compactarse	
	Ca apenas sobre el nivel crítico	Anaerobiosis localizada	
VERTISOLES			
Guanacaste	fijación de K y amonio en 2:1	inundables, pésimo drenaje	
	desbalances de bases, bajo K	Agrietamiento en verano	
	P bajo, fosfatos de Ca	profundidad moderada, 1 m	
	problemas de deficiencia de Zn y S	ruptura de raíces por agrietamiento en perennes	
	a veces, deficiencias de Mn y Fe por pH alto	bajo riego, adición de MO incrementa condiciones de reducción, alta solubilidad de Fe y Mn	

Cuadro 2. 2 Limitantes nutricionales específicas identificadas en grupos y zonas de suelos Rojos y Aluviales de Costa Rica

	QUIMICAS	FÍSICAS y BIOLÓGICAS	FORTALEZAS NUTRICIONALES
ROJOS	poca CICE por arcillas 1:1 alta lixiviación	estructura susceptible de deteriorarse	buena estructura por seudoarenas
Zona Norte arriba	muy deficientes en P	capa orgánica delgada Subhorizonte muy arcilloso susceptibles de compactar	poco ácidos
Zona Norte abajo Sarapiquí, Sn Carlos Atlántico	de ácidos a muy ácidos por alto Al muy bajos en Mg		
Pital	de ácidos a muy ácidos por fuerte Al bajos en Mg bajos en P		K en muy buen nivel Zn adecuado
Sur	los más viejos, muy ácidos algunos muy empobrecidos en bases con muy poco Ca y Mg muy bajos en Zn		P se ha mejorado por manejo K está bien (es alto pero para esta condición es bueno)
Los Santos	acidez inducida por manejo, hay toda la gama de %SA, niveles muy bajos de Zn		bases bien, no hay problemas de Mg K medio, P muy adecuado
ALUVIALES			
Atlántico Oeste	pueden incrementar su acidez extraíble y empobrecerse por manejo deficiencias de Zn Ca apenas sobre el nivel crítico deficiencias de Zn	susceptibles de lavarse	niveles de bases moderados, Ca <20, Mg<3
Atlántico Este	tendencia a desequilibrios por bajo K y muy altos Ca (>20) y Mg (>3)		
Pacífico Central	grandes desequilibrios de bases por bajo K y muy altos Ca (>20) y Mg (>3)	mezclas texturales	
(Parrita)	deficiencias de Zn niveles bajos de P	drenaje complicado	
Pacífico Central	desequilibrios moderados de bases por bajo K y niveles medios de Ca (<20) y Mg (<3)	mezclas texturales	
(Quepos)	tendencia a subir el Al extraíble deficiencias de Zn, niveles bajos de P	drenaje complicado	niveles de bases moderados, Ca<20, Mg<3
Pacífico Sur	tendencia a subir el Al extraíble (>1.5) a pesar de niveles moderados de Ca (<15) y Mg (<2.5)	drenaje complicado	
(Palmar, Coto)	probabilidad media de deficiencias de Zn		
Pacífico Sur	niveles muy bajos de Ca (<3)		
(Celajes)	niveles bajos de K (<0.3) niveles bajos de P	drenaje complicado	

4. BIBLIOGRAFÍA RECOMENDADA

Fageria N., Baligar V. and Allan Ch. 1997. Growth and mineral nutrition of field crops. 2nd ed. Marcel Dekker, Inc. New York, USA. 624 p.

Magdoff F. and Van Es, Harold. 2000. Building Soils for better crops. 2nd ed. Sustainable Agriculture Network handbook series; bk. 4. Washington, DC. 230 p.

Marschner H. 1995. Mineral nutrition of higher plants. 2nd ed. Academic Press. San Diego, CA. 889 p.

Pinton R., Varanini Z. and Nannipieri P. 2001. The Rhizosphere: Biochemistry and organic Substances at the Soil-Plant Interface. Marcel Dekker, Inc. New York, USA. 424 p.

Prasad R. and Power J. 1997. Soil Fertility management for sustainable agriculture. CRC. Press. Florida, United States. 356 p.

Rengel Z. 1999. Mineral Nutrition of crops: Fundamental mechanisms and implications. Food Products Press. USA. 399 p.

Tinker P. and Nye P. 2000. Solute Movement in the Rhizosphere. Oxford University Press, Inc. 444 p.

MANEJO DE SUELOS DERIVADOS DE CENIZAS VOLCÁNICAS

Alfredo Alvarado[1]

1. DISTRIBUCIÓN DE ANDISOLES

Los Andisoles, también conocidos como Ando, Andosoles y Andepts, son suelos formados en su gran mayoría a partir de ceniza volcánica y abarcan aproximadamente 100 millones de hectáreas o sea el 0,8% del total de tierra del planeta (Fernández-Caldas y Yaalon 1984). Estos suelos dominan principalmente en regiones relacionadas con actividades volcánicas asociadas a las zonas de interacción de placas tectónicas, tales como el Anillo de Fuego del Pacífico y el Valle del Cañón del Oriente Africano.

Estimaciones preliminares sobre Andisoles de Costa Rica consideraban un área de 719 000 ha que representan aproximadamente el 3,3% del área total del país (FAO-UNESCO 1976). Datos más recientes que incluyen los Andisoles aluviales en la Zona Atlántica y la Zona Sur elevan la cifra a un 14% (Mata 1991). En Costa Rica las áreas volcánicas con potencial agrícola incluyen tres subórdenes de Andisoles: los Vitrands de altura, los Udands de clima medio y los Ustands del piedemonte. En zonas plano-cóncavas alejadas de los conos volcánicos y bajo condiciones de clima estacional seco definido tienden también a formarse los Ustands, asociados con Vertisoles. Para fines de manejo, aquellos suelos que clasifiquen dentro de otros órdenes pero estén cubiertos por una capa de cenizas de más de 30 cm de espesor, deberían considerarse como Andisoles del suborden correspondiente al régimen de humedad en que se encuentren.

La literatura sobre clasificación de Andisoles a nivel nacional permite definir con certeza regiones dominadas por Andisoles en Guanacaste, el Valle Central y la Zona Sur, con pequeñas áreas adicionales en Talamanca y la Zona Atlántica. Alvarado y Bornemisza (1984) diferencian los suelos derivados de ó afectados por la deposición de cenizas volcánicas en: poco profundos, profundos y otros no desarrollados de cenizas volcánicas pero recubiertos por capas de cenizas relativamente delgadas.

Los suelos poco profundos ocurren cuando se presentan: 1) deposiciones de lava recientes cubiertas por capas delgadas de cenizas recientes (Knox y Maldonado 1986), 2) baja temperatura imperante en zonas frías de altura (Otárola y Alvarado 1977), 3) capas de aluvión compactadas por debajo de la ceniza (Más 1981) ó 4) ignimbritas localmente conocidas como tobas bajo condiciones ústicas a poca profundidad en Guanacaste (Winters 1997), como ocurre en otras partes de América Latina (Zebrowski *et al.* 1997). Los Andisoles poco profundos cerca de los cráteres principales clasifican como Umbric o Typic Vitrandepts y bajo vegetación de roble pueden evolucionar en posiciones planas a Typic Placandepts o Typic Andaquepts y en posiciones inclinadas a Typic Dystrandepts (Otárola y Alvarado 1977, Blaser 1990). Otros suelos poco profundos como en Cervantes de Cartago

[1]Este trabajo es un resumen de la obra: Alvarado, A. *et al.* 2001. Suelos Derivados de Cenizas Volcánicas (Andisoles) de Costa Rica. Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo. San José, Costa Rica, en el cual pueden consultarse cuadros, figuras y referencias bibliográficas.

clasifican como Dystrandepts de tipo esquelético (Knox y Maldonado 1986) o paralíticos como ocurre en Paso Canoas, Puntarenas (Más 1981).

La mayoría de los suelos profundos clasifican como Hapludands, aunque también son comunes los Haplustands, los Hydrudands y los Melanudands que ocupan las partes medias y bajas del relieve volcánico. Dependiendo del régimen de humedad del suelo, el horizonte negro superior cambia a pardo amarillento o pardo rojizo en el subsuelo. Cuando la adición de cenizas volcánicas no es muy frecuente, estos suelos llegan a desarrollarse y forman horizontes cámbicos o argílicos que clasifican como Inceptisoles, Ultisoles o Alfisoles normalmente con características ándicas. Los subgrupos más frecuentes son los Typic, aunque también se encuentran los extragrados Acrudoxic, Dystric, Humic y Thaptic (Alvarado 1975, Jiménez 1979, Knox y Maldonado 1969, Otárola y Alvarado 1977, Más 1981,Vásquez 1982, Mata y Ramírez 1999).

Con bastante frecuencia se encuentra suelos viejos cubiertos por capas de ceniza reciente de menos de 50 cm de espesor. Estos casos se consideran como grandes grupos o subgrupos ándicos de otros órdenes tales como los Andic Dystropept (Rojas 1973), Andic Rhodustult (Alvarado *et al.* 1982), Andic Humitropept y Andaquepts (Blaser 1990). Cuando el grado evolutivo de los suelos es mayor, aunque se hayan originado a partir de cenizas volcánicas, estos clasifican como Humic Hapludults o Ultic Haplustalfs (Mata y Ramírez 1999).

En el presente trabajo se respeta la clasificación original dada por los autores a los diferentes suelos, considerándose las siguientes equivalencias en forma aproximada:

Dystrandepts	Hapludands, Melanudands, Haplustands
Placandepts	Placudands
Hydrandepts	Hydrudands
Vitrandepts	Udivitrands
Eutrandepts	Haplustands

2. FACTORES Y PROCESOS DE FORMACIÓN DE ANDISOLES EN COSTA RICA

Como en otras partes del mundo, los principales factores que afectan la formación de estos suelos incluyen: 1) la separación por tamaño y por densidad de las partículas eyectadas, orientada por los vientos dominantes (Alvarado y Bornemisza 1984), 2) las gradientes de temperatura y humedad inducidas por la orografía y 3) los cambios en la cobertura vegetal en diferentes pisos altitudinales. La formación de los Andisoles en Costa Rica es relativamente rápida (Harris 1971, Chaverri y Alvarado 1979, Nieuwenhuyse *et al.* 1993) y normalmente los horizontes subsuperficiales son más viejos que los horizontes superficiales, debido a la continua adición de cenizas a su superficie, lo que permite la formación de paleosoles visibles en muchos cortes de carreteras.

Algunos procesos de formación en Andisoles que han sido corroborados en el país incluyen: la melanización en Andisoles cubiertos por *Pennisetum clandestinum* (Sáenz 1966, Alvarado y Buol 1975), la acumulación y translocación de P, S y Cu del suelo al subsuelo con el desarrollo del perfil (Fox 1974, Soto 1998, Mata y Ramírez 1999), el movimiento vertical

de ácidos fúlvicos con poder de quelatizar Fe (Alvarado y Buol 1975, Blaser 1990), la absorción de Si por los pastos permitiendo la formación de fitolitos (Andriesse y Muller 1973, Alvarado y Buol 1975), la podsolización bajo vegetación de *Quercus* spp. en Andisoles de altura (Harris 1971, Otárola y Alvarado 1977, Blaser 1990), la pérdida de bases por lavado (Alvarado y Mata 1993, Nieuwenhuyse y van Breemen 1997) y la transformación en el tiempo de minerales primarios a materiales secundarios no cristalinos y cristalinos (Besoaín 1976, Andriese y Muller 1973, Colmet-Daage *et al.* 1973, Alvarado 1974, Tam *et al.* 1975, Gómez *et al.* 1981, Alvarado 1982, Bertolani y Loschi-Ghittoni 1986, Dooremolen *et al.* 1990, Nieuwenhuyse *et al.* 1994, Nieuwenhuyse y van Breemen 1997).

Una característica notoria de los Andisoles es su elevado contenido de materia orgánica, el cual les imprime en parte propiedades tales como reducir su densidad aparente, favorecer la retención de humedad, color negro oscuro, quelatización de cationes y facilidad de manejo. Pocos trabajos se han realizado en el país para estudiar este componente del suelo, aunque se documenta su velocidad de mineralización (Bornemisza y Pineda 1969, Grieve *et al.* 1990), su movimiento como ácidos húmicos/fúlvicos (Alvarado 1974), metodologías para su determinación (Bornemisza *et al.* 1979) y su contribución al reciclaje de nutrimentos (Fassbender 1993, Babbar y Zak 1995).

3. PRINCIPALES REGIONES DE ANDISOLES DE COSTA RICA

Andisoles de Guanacaste

Los suelos derivados de cenizas volcánicas de Guanacaste se encuentran principalmente alrededor de los volcanes Orosí, Rincón de la Vieja, Miravalles, Tenorio y Arenal, aunque en la misma cordillera existe un sinnúmero de volcanes de diferente tipo y edad que también han contribuido a la deposición de cenizas volcánicas (Barquero y Sáenz 1987). Asociada con los volcanes también se encuentra una gran actividad geotermal (Alvarado 2000), la cual en algunos sitios favorece una meteorización acelerada de los materiales depositados (Méndez 1977, Centro Científico Tropical 1980, Laguna 1985, Sáenz *et al.* 1993). Algunos otros trabajos relacionados con la cartografía de los suelos de Guanacaste mencionan la ocurrencia de Andisoles formados de cenizas del Volcán Rincón de la Vieja que descansan sobre ignimbritas (Winters 1997) y de otros focos volcánicos (Mata 1982).

La mayoría de los Andisoles de la Cordillera de Guanacaste clasifican como Typic o Fluventic Hydrandepts o Dystrandepts asociados a Andic Tropohumults, Udic Argiustolls y Typic Tropofluvents. En estos suelos el pH oscila entre 5,3 y 6,2 y el contenido de Al intercambiable es bajo, mientras que el contenido de bases cambiables es mayor que el de los de los Andisoles del (Palencia y Martini 1970), contenidos bajos a muy bajos de K y niveles adecuados de Cu y Fe, aunque bajos de Zn y Mn (Centro Científico Tropical 1980).

Desde el punto de vista físico, estos Andisoles presentan textura gruesa y contenido de arcilla inferior al 20% en cualquier horizonte del perfil. Los Andisoles del piedemonte de la cordillera clasifican como Typic Dystrandepts, asociados con Andic Ustic Humitropepts y Lithic Ustorthents (Mata 1982).

Andisoles del Valle Central

En el Valle Central de Costa Rica, la existencia de Andisoles es fundamental para el establecimiento de las principales ciudades del país. La producción de variados tipos de productos agrícolas principalmente en las laderas de los volcanes Poás, Barba, Irazú y Turrialba permitió el desarrollo de esta zona. Los primeros estudios cartográficos del país reconocen varios suelos como "negros de cenizas y lavas" bajo las series Cervantes, Birrisito, Heredia, y otras tan mencionadas en la literatura costarricense (Dóndoli y Torres 1954, Costa Rica/MAI 1958).

Las principales características de los Andisoles del Valle Central varían según los varios volcanes la cordillera. La variación de las propiedades químicas y físicas de estos suelos con la elevación sobre el nivel del mar, no solo se refleja en una disminución del grado de meteorización del material parental y de la mineralización de la materia orgánica (Grieve *et al.* 1990), sino con la formación de diferentes tipos de arcilla (Colmet-Daage *et al.* 1973) y la fijación de P (Soto 1998). Estos suelos son los más utilizados y por esa razón los que presentan más impacto antrópico, el cual se refleja en acumulaciones importantes de fósforo y cobre, así como en el lavado de cationes por la acidificación residual de fertilizantes.

En general, los suelos tienen alta porosidad total y de macroporos que coadyuvan a la formación de microagregados estables y a favorecer una alta velocidad de infiltración; por esta razón, su erosión ocurre principalmente cuando las lluvias son muy intensas y el manejo no es adecuado. En particular sufren de este problema cuando se los deja al descubierto por períodos prolongados para plantar cultivos hortícolas durante la estación lluviosa o durante el primer año de establecimiento de plantaciones de café, cuando la cobertura que ofrece el cultivo es limitada. Un porcentaje elevado de la erosión en estos suelos se debe a caminos mal construidos o a sistemas de riego mal diseñados; en el primer caso es importante mencionar que aunque en forma natural los Andisoles presentan una macroestructura columnar, los taludes de caminos siguen haciéndose inclinados causando erosión retroactiva de los mismos de grandes proporciones.

Andisoles de la Zona Atlántica

De acuerdo con López y Solís (1991), los suelos de la Zona Atlántica oeste se forman principalmente sobre materiales de desbordamiento de origen volcánico (coladas de lava, rocas piroclásticas, rocas andesíticas, lahares pequeños, ignimbritas, basaltos y cenizas del Cuaternario), los cuales dan origen a suelos de baja fertilidad; además debe recordarse el basamento volcánico de esta región, en la cual se encuentran trece restos de edificios volcánicos (Barquero y Sáenz 1987). Estos suelos contrastan con los de la Zona Atlántica este, formados a partir de sedimentos aluviales provenientes de depósitos marinos clásticos finos y en algunas localidades de calizas.

Los Andisoles de la Zona Atlántica son muy variados y presentan diferentes grados de desarrollo edáfico, dependiendo de la zona en que se encuentren. En algunos sitios están sujetos a inundaciones frecuentes y presentan pedregosidad elevada, a veces asociada a mal drenaje; en posiciones fisiográficas más estables tienen mayores contenidos de arcilla y un

grado de acidez considerable. Dependiendo del tipo de explotación agropecuaria, pueden requerir de drenaje, fertilización y con menor frecuencia de encalado, tal es el caso del cultivo del banano y en menor escala del palmito. Su baja fertilidad natural hace que los agricultores de escasos recursos obtengan bajos rendimientos o los dediquen a ganadería extensiva, en cuyo caso debe considerarse su posible compactación.

Andisoles de la Zona Sur

Los primeros estudios sobre los Andisoles de esta región se deben a López (1978) quien describe algunos perfiles y realiza análisis de mineralogía de arcillas en Corredores y Coto Brus. Posteriormente, se identifican áreas importantes de este tipo de suelos cuando Más (1981) realiza el estudio de la región fronteriza con Panamá y describe el abanico aluvial pleistocénico de Canoas como Unidad Fisiográfica C, con Lithic, Aquic y Typic Dystrandepts ocupando un 21,7% de un total de 51 210 ha evaluadas. Otro estudio relevante para la región lo constituye el trabajo de Bornemisza *et al.* (1988), en el cual se incluyen los Typic Hydrandepts y los Hydric Dystrandepts.

La mayoría de los Andisoles de esta región se encuentran en terreno ondulado a fuertemente ondulado y se forman a partir de cenizas depositadas por los volcanes Cotón Pelón, Barú y Bola (López 1978, Barquero y Sáenz 1987, Bornemisza *et al.* 1988); sin embargo, estos mismos materiales acarreados por los ríos también se depositan en abanicos aluviales en relieves planos a plano cóncavos (Más 1981). En estos suelos ocurre una marcada deficiencia de K como lo documentan Henríquez (1996) y Henríquez y Bertsch (1997). Los aluviones en terreno plano, presentan como limitantes principales la elevada pedregosidad y reducida profundidad efectiva, las cuales aunadas a las lluvias copiosas de la región causan mal drenaje en algunas situaciones.

Andisoles de Talamanca

En la década de los 70, se describieron áreas de poca extensión de Andisoles en Talamanca (Harris 1971, Otárola y Alvarado 1977, Landaeta *et al.* 1978), estudiados con mayor detalle recientemente (Blaser 1990). Las condiciones de baja temperatura y alta precipitación en que se forman estos suelos, permiten el crecimiento de una vegetación particular, combinación que favorece la andolización o la podsolización, dependiendo de la vegetación dominante. Blaser (1990) menciona que los Placandepts tienden a dominar cuando se presenta vegetación de "bosque mixto de encino" (*Quercus costarricensis*), mientras que cuando la vegetación es de "bosque de roble blanco" (*Quercus copeyensis*) dominan los Dystrandepts.

Bajo las condiciones frías y húmedas de la Cordillera, se forman suelos poco profundos en edades radiogénicas que oscilan entre 400 y 2 500 años, con mineralogía no cristalina cuando dominan las cenizas volcánicas y de óxidos de hierro cuando el proceso es dominado por la podsolización (Harris 1971). Es común encontrar variaciones en pH y bases intercambiables contrastantes entre horizontes de suelos de formación natural ácida y otros enterrados que se han visto enriquecidos por quemas, tal como lo mencionan Otárola y Alvarado (1977) y corroborado posteriormente por Williamson *et al.* (1986).

4. DISPONIBILIDAD DE NUTRIMENTOS EN SUELO Y SUBSUELO

La fertilidad de once horizontes A y B de Andisoles del Valle Central de Costa Rica fue analizada por Palencia y Martini (1970) encontrando que las principales diferencias entre el suelo superficial y el subsuelo son el decrecimiento en el contenido de materia orgánica y de nitrógeno. Este fenómeno es aún más pronunciado en los Andisoles de la zona fronteriza con Panamá (Más 1981) en donde, además el contenido de cationes disminuye drásticamente con la profundidad debido al lavado intenso causado por la precipitación pluvial elevada. Las cenizas provenientes de diferentes volcanes dan origen también a suelos de variada fertilidad, de manera que es común encontrar en los suelos de las faldas del Volcán Poás contenidos mayores de sodio y fósforo nativos y menores de calcio y materia orgánica que en los formados en las laderas del Volcán Irazú (Alvarado 1975).

Al comparar el estado nutricional de los suelos dedicados al cultivo del café del Valle Central en fincas con alta y baja tecnología se encontró, en promedio, que el pH es bajo y el nivel de acidez intercambiable medio a bajo en ambas tecnologías; sin embargo, el valor promedio de la acidez intercambiable fue el doble en fincas con alta tecnología y el porcentaje de saturación de acidez 2,6 veces mayor. Estos cambios se ven acompañados de pérdida neta de bases cambiables (Ca, Mg y K) cuando se utiliza alta tecnología debido a mayor extracción de estos nutrimentos por el cultivo y al efecto residual ácido de los fertilizantes nitrogenados amoniacales utilizados (Cabalceta *et al.* 1996).

NITRÓGENO

Respuesta a la fertilización nitrogenada

El nitrógeno es reconocido como el elemento más necesario en la fertilización de cultivos en regiones tropicales, dada la respuesta de los cultivos a su aplicación. Los Andisoles no son la excepción y la respuesta al elemento se ha documentado en invernadero (Palencia y Martini 1970, Bertsch 1982) y en campo para los cultivos café (ICAFE/MAG 1990), caña de azúcar (Chaves y Alvarado 1994), forrajes (Castillo *et al. 1983,* Sánchez *et al.* 1985 y Alvarado y Salas 1997), brócoli (Soto 1991), papa (Bianchini 1973), cebolla (Soto 1988) y fresa (Salas *et al.* 1989).

Estudios de fertilización del cafeto a largo plazo realizados por el ICAFE/MAG (1990), demuestran que el cultivo responde a aplicaciones de hasta 400 kg N ha^{-1} (el nivel económico de aplicación más recomendado es de 300 kg N ha^{-1} fraccionado) con incrementos en rendimiento importantes. Por esta razón la adición de N en Andisoles al cultivo del café es obligatoria, normalmente acompañada de otros elementos y encalado para evitar la acidificación. En el caso del café, la necesidad de N puede variar según sea que se siembre con sombra o a pleno sol, en el primer caso el uso de leguminosas arbóreas como sombra es capaz de contribuir con cantidades significativas de N a la plantación (Fassbender 1984).

El efecto del N sobre la producción de pastos también es notorio en Andisoles en los que la aplicación de urea se ha recomendado por muchos años. Este tratamiento ha desmejorado la composición de la pastura, ya que el N favorece el crecimiento del pasto

kikuyo, el cual a su vez ahoga el trébol blanco asociado. La adición de hasta 500 kg N ha^{-1} incrementa la producción de materia seca de este forraje, con fuertes diferencias en producción entre las épocas seca y lluviosa imperantes en esta región. En este caso, la fuente del fertilizante nitrogenado no mostró diferencias significativas (Castillo *et al. 1983 y* Sánchez *et al.* 1985). La experiencia de campo indica que una dosis de 250 kg N ha^{-1} fraccionado en aplicaciones posteriores al pastoreo de las parcelas maximiza la utilización de fertilizante nitrogenado.

Movimiento del nitrógeno proveniente del fertilizante en el suelo

Debido a la preocupación por lograr la mejor recuperación del fertilizante nitrogenado por los cultivos en Andisoles, se han realizado varios trabajos con inhibidores de la nitrificación y fuentes de N de baja solubilización (González *et al.* 1985, Pacheco *et al.* 1986, Bornemisza *et al.* 1990, Salas *et al.* 1995). Recientemente, la preocupación por la contaminación ambiental, también ha conducido a establecer estudios de campo para determinar el movimiento del N hasta el manto freático (Reynolds 1991, Araguás *et al.* 1994, Babar y Zak 1995) así como conocer el aporte de N al ecosistema proveniente de leguminosas arbóreas (Matson *et al.* 1987, Fassbender 1993).

El movimiento del N aplicado como fertilizante en café depende de varios factores tales como la cantidad y forma del fertilizante aplicado, la cantidad de lluvia, el sistema de cultivo y el tipo de suelo. González *et al.* (1985) encontraron que el movimiento de nitratos en un Dystrandept del Valle Central se dio hasta profundidades de 90 cm, aunque el efecto fue menor durante la primera aplicación (inicio de las lluvias) que durante la segunda cuando ocurre el pico de máxima precipitación. La poca movilidad del N en el perfil del suelo se atribuyó a una cierta capacidad de fijación de este elemento en las capas superficiales.

FÓSFORO

Formas de fósforo en Andisoles de Costa Rica

Estudios realizados por Soto (1998), muestran que el P total en Andisoles de Costa Rica a la profundidad de 0 a 0,4 m oscila entre 817 y 5 460 mg kg^{-1}, cantidad que disminuye a valores entre 717 y 2 038 mg kg^{-1} a profundidad de 0,5 a 1,0 m debido al efecto superficial de la aplicación de fertilizantes. Sin embargo, tan solo entre 6 y 161 mg kg^{-1} de P en Olsen modificado se encuentran en forma disponible para las plantas, resultados que concuerdan con la conocida respuesta de los cultivos a la aplicación de P en este tipo de suelos (Palencia y Martini 1970, Perera 1976, Bertsch 1982, Palmieri 1983, Molina *et al.* 1993, Chaves y Alvarado 1994).

Entre el 22 y el 60% del P de los Andisoles se encuentra como P-orgánico (Henríquez *et al.* 1994), con valores que dependen en mucho del método de fraccionamiento que se utilice. En un amplio número de muestras, Soto (1998) encontró que el P-orgánico representa el 35% del P total en estos suelos y que osciló entre 153 y 2 165 mg L^{-1}. Mucho del P de esta fracción está asociado con formas activas de Al y Fe en complejos orgánicos, además de alofana y ferrihidrita.

Retención del fósforo en Andisoles

Fassbender *et al.* (1968) encontraron que en Costa Rica, en promedio, los Andisoles retuvieron el 86,4% del P adicionado, mientras que los Latosoles (Ultisoles) y los Aluviales (Inceptisoles) retuvieron el 58,2% y el 42,0%, respectivamente. En otro trabajo con Andisoles, se encontró que el 82,4% del P adicionado al suelo fue retenido, el 82,5% como Al-P, el 14,4% como Fe-P, el 1,6% como Ca-P y el 2,9% como P soluble en NH_4Cl (Igue y Fuentes 1971). Sin embargo, la retención de P en Andisoles puede oscilar entre 5,5 y 99,9% del P adicionado (Alvarado y Buol 1985) y la forma en que se fija depende de factores como manejo del suelo y del grado de evolución del perfil (Soto 1998), lo que se puede asociar con los subórdenes de Andisoles (Canessa *et al.* 1986).

La cantidad de P retenido por los Andisoles varía con la altura sobre el nivel del mar y el régimen de humedad. Los valores más bajos de retención se encuentran a mayor elevación debido a la textura gruesa y a la poca meteorización que ocurre por la baja temperatura de los suelos. La mayor retención de P se ubica en las zonas medias donde se forma una considerable cantidad de arcilla no cristalina acompañada de materia orgánica.

Necesidades de fósforo por los cultivos

La información anterior se corroboró en un estudio de invernadero en el cual se adicionó P a plantas de sorgo para ver el requerimiento de P como fertilizante, así como su absorción. Las cantidades de P requeridas para lograr llenar niveles críticos foliares de P en sorgo equivalentes a 0,15 o 0,20%, los cuales aumentaron de los Vitrandepts a los Dystrandepts y a los Hydrandepts (Canessa *et al.* 1987).

La recuperación de fósforo proveniente del fertilizante por los cultivos es sumamente baja en Andepts. En un estudio realizado por Bornemisza y Fassbender (1970) en el que se aplicó 200 ppm de P_2O_5 se encontró que las plantas de maíz solo absorbieron el 1,1% del P del fertilizante. El uso de diferentes fuentes de fósforo afecta su disponibilidad; Urrutia e Igue (1972) encontraron que el fosfato monocálcico monohidratado y el superfosfato simple se disolvieron más rápido que el fosfato dicálcico anhidro. Según Suárez e Igue (1974) los granos de fertilizante fosfatados de mayor diámetro produjeron el mayor efecto residual, afectando el segundo cultivo de maíz en el invernadero.

Tanto el cultivo de la papa como el de la brócoli y la fresa responden a la aplicación de fósforo en Andisoles (Palmieri 1983, Perera 1976, Molina *et al.* 1993). La cantidad de P necesaria para obtener el rendimiento máximo en papa varía entre 480 kg P_2O_5 ha^{-1} en un Typic Dystrandept (Chaverri y Bornemisza 1977) hasta 858 kg P_2O_5 ha^{-1} en un Hydric Dystrandept (Palmieri 1983). En el cultivo de la fresa, la aplicación del P fraccionado a la siembra y dos aplicaciones más espaciadas cada 30 días ofrece mejor resultado que una sola aplicación, pues se reduce la posibilidad de retener P por parte del suelo (Molina *et al.* 1993). La dosis de P utilizado en Andisoles de Costa Rica depende principalmente de las necesidades del cultivo. De esta forma, el suministro de P en hortalizas y plantas ornamentales generalmente es alto, en tanto que en cultivos perennes tiende a ser de moderado a bajo

POTASIO

Formas de potasio en Andisoles de Costa Rica

El estudio de las formas de K (total, estructural, no intercambiable, intercambiable y en solución) permite conocer la dinámica de este elemento en el suelo y además, conocer la capacidad de abastecimiento de K para las plantas. En general, la concentración de las diferentes formas de K en Andisoles es moderadamente alta y se halla ligada a la composición del material piroclástico que les da origen así como a las condiciones ambientales en las cuales se lleva a cabo su meteorización.

En Andisoles de Costa Rica, el K en solución representa tan solo entre el 0,3 y el 1,2% del total, el K intercambiable extraído con acetato de amonio representa entre el 1,0 y el 12,6%. La fracción más grande de K la conforma el K estructural que comprende entre el 79,7 y el 97,3% del K total (Molina *et al.* 1986). Estos valores son consistentes con los encontrados por Bertsch *et al.* (1984) pero inferiores a los mencionados por otros autores para el Vale Central (Suárez 1968, Martini 1970, Alvarado 1975).

Retención de potasio en algunos Andisoles

El fenómeno de retención de potasio en suelos se define como el proceso por el cual las formas disponibles del elemento migran al retículo o malla cristalina de los minerales arcillosos similares a la mica y por lo tanto no deben ser muy importantes en Andisoles. Sin embargo, Henríquez *et al.* (1994) encontraron porcentajes de retención del elemento en Vertisoles (56%)>Inceptisoles (33%)> Andisoles (26%)> Ultisoles (16%), siendo que en los Andisoles el 65% de las muestras retuvieron entre el 20 y el 40% del K agregado al suelo en el laboratorio. El elevado coeficiente de variación de los resultados para Andisoles deja ver la gran variabilidad mineralógica de este tipo de suelos y dicha retención se atribuye a un cierto grado de afinidad de la alofana por el K.

Liberación de potasio en Andisoles

La velocidad de restitución de K en Andisoles es una importante variable a considerar cuando se trata de cultivos con elevados requerimientos de este elemento por períodos cortos. En un ensayo de incubación con Andisoles de áreas cafetaleras del Valle Central, Arias (1971) extrajo el K intercambiable del suelo y luego lo mantuvo a humedad de campo por seis meses, determinando el K intercambiable a los 2, 4 y 6 meses en extracciones sucesivas de la misma muestra.

El contenido de K disponible en Andisoles puede variar grandemente (Palencia y Martini 1970, Alvarado 1975), además de que la restitución del elemento en el tiempo es proporcional a la cantidad inicialmente extraída. Probablemente la metodología empleada no estima correctamente lo que las plantas pueden extraer en el campo, pero ciertamente las diferencias relativas entre suelos son dignas de consideración al realizar recomendaciones de fertilización.

Respuesta de los cultivos a la fertilización potásica

Indiferentemente del valor de los rendimientos obtenidos, la adición de 120 kg K_20 ha^{-1} con una base de 0,8 ton dolomita ha^{-1}, 100 kg N ha^{-1} y 180 kg P_20_5 ha^{-1} a los Andisoles de la Zona Sur del país mejora en forma significativa la cosecha de maíz y frijol y el fraccionamiento de la aplicación de K no afectó significativamente el rendimiento (Henríquez 1996).

De acuerdo con Henríquez y Bertsch (1997) el efecto antagónico entre el K y el Ca cuando se aplican los dos elementos al suelo ocurre más intensamente si ambos elementos están por debajo de los niveles de suficiencia, considerado el de K como 0.2 cmol(+) L^{-1} y estimado por Soto (1988) en 0.4 cmol(+) L^{-1} para el cultivo de la cebolla.

En el Valle Central, Chaves y Alvarado (1994) también encontraron respuesta significativa de la caña de azúcar a la adición de K. El hecho de que los Andisoles del Valle Central presenten contenidos medios de K, mientras que los de la Zona Sur sean bajos, hace que en el primer caso se apliquen no más de 150 kg K_2O ha^{-1}, mientras que en la Zona Sur se llegue hasta 200 kg ha^{-1} empleando fórmulas fertilizantes más altas en K.

AZUFRE

Formas de azufre en Andisoles

El contenido total de S en Andisoles de Costa Rica oscila entre 500 y 1 500 mg L^{-1} (Alvarado y Mata 1993), valores que se reflejan en los niveles entre 18 y 25 mg L^{-1} de S extraídos con agua caliente de cenizas volcánicas recién depositadas (Bornemisza 1971). Aunque los contenidos de S sean altos, la fijación de S en Andisoles es muy variable y puede oscilar entre 33,6 y 95,0%. Blasco (1972) encontró que la fracción de S inorgánico es mayor que la fracción de S orgánico en Andisoles y que ambas fracciones permanecen casi constantes con el desarrollo de estos suelos.

Fox (1974) encontró que el azufre disponible en Andisoles de Costa Rica aumenta con el desarrollo de los suelos debido principalmente al incremento del contenido de materia orgánica asociada a la formación de materiales no cristalinos en Andisoles. El S también aumenta con la profundidad del perfil debido a que en Andisoles los horizontes inferiores son más antiguos que los horizontes superficiales, desarrollados sobre cenizas volcánicas recientes. Este aumento con el grado de meteorización también podría verse enmascarado por la aplicación consecutiva en períodos prolongados de este elemento, como es el caso del cultivo del café (Mata y Ramírez 1999), así como un desplazamiento hacia los horizontes inferiores por aplicaciones superficiales de P.

Respuesta de los cultivos a la aplicación de azufre en Andisoles

La deficiencia de S a nivel de campo puede darse con frecuencia y como tal se mencionaba en el pasado cuando se empleaba superfosfato triple en vez de superfosfato sencillo. Aún hoy en día, la deficiencia puede ocurrir en explotaciones intensivas cuando se emplean mezclas físicas de fertilizante que no contienen este elemento. La adición de 60 kg

S ha^{-1} a plantas de sorgo bajo condiciones de invernadero no mostró aumento del rendimiento (Pérez y Oesligle 1975), hecho atribuido posteriormente por Bertsch (1982) a que otros elementos fueron más limitantes para la producción.

ACIDEZ Y ENCALADO

La acidificación de los suelos derivados de cenizas volcánicas ocurre rápidamente en forma natural debido a la inestabilidad mineralógica y a la solubilidad de los materiales volcánicos recién eyectados (Bornemisza 1971, Chaverri y Alvarado 1979). En adición, la emanación constante de vapores en los cráteres de volcanes activos, baja el pH del agua de lluvia hasta valores de 3,8, favorece la solubilización de las partículas primarias y por ende el lixiviado de bases del sistema suelo (Rodríguez *et al.* 1995). A esta situación, recientemente se suma el problema de la acidificación antropogénica causada por la exportación de nutrimentos por las cosechas y el uso de fertilizantes nitrogenados con efecto residual ácido, problema este último también asociado con deficiencia de magnesio en el cultivo de café (ICAFE-MAG 1990).

En un ensayo de campo midiendo el rendimiento de maíz y frijol en rotación, bajo diferentes sistemas de cultivo en callejones, Kass *et al.* (1995) encontraron que la aplicación de 2,6 ton cal ha^{-1} a un Acrudoxic Melanudand mejoró significativamente el rendimiento de los cultivos, no así el de las especies arbóreas comparadas (*Erythrina fusca* y *Inga edulis)* para las cuales el contenido de Mg en el suelo correlacionó positivamente con el contenido de Mg foliar. Debido a que el contenido de Mg en suelo era bajo (0,10 A 0,31 cmol kg^{-1}) los mismos autores aplicaron a los árboles 25 kg de Mg ha^{-1} como $MgSO_4$ $7H_2O$ y sugieren que el requerimiento de este elemento para especies arbóreas es más elevado que el de los cultivos anuales; este también es el caso de otros cultivos perennes como el café (Alfaro 1998).

COBRE

Los estudios con cobre en Andisoles de Costa Rica se inician en 1973, debido a la preocupación por la posible acumulación de este elemento en suelos cafetaleros, por la aplicación frecuente de fungicidas cúpricos para el control de enfermedades fungosas. Con la llegada de la roya del café en los años 80, el uso de estos productos se intensificó, lo que motivó aún más la investigación sobre el comportamiento del elemento en el suelo gracias a los esfuerzos ambientalistas promovidos por el Gobierno y los grupos privados. Para el caso del café en Andisoles, se considera que niveles en el suelo superiores a 100 mg Cu L^{-1} disponible (Olsen mod.) pueden dañar plantas jóvenes del cultivo (Chavarría 1999) mientras que en Ultisoles valores superiores a 200 mg Cu L^{-1} tienen el mismo efecto (Corrales 1995).

En este sentido Koss *et al.* (1973) encontraron niveles moderados de Cu en el suelo y en plantas de café (22,9 y 13,9 mg L^{-1}, respectivamente) los cuales se elevaron al doble en diez años según mencionan Cabalceta *et al.* (1996). Datos similares encontraron Granados y Bornemisza (1991) en un Hapludand de un cafetal del Valle Central, quienes informan de valores de 94 mg Cu L^{-1}.

Cuando en el cultivo del café se utiliza alta tecnología, la acumulación de Cu en el suelo es mayor. Además, la acumulación del elemento en el horizonte superior del suelo es mayor en áreas en las cuales se aplica más fungicida y con más frecuencia debido a la mayor precipitación pluvial, como sucede en Coto Brus y no tanto en regiones más secas como el Valle Central (Cabalceta *et al.* 1996).

ZINC

La deficiencia de Zn para café en producción se identificó en Costa Rica hace bastante tiempo (Pérez, 1957). Este problema está asociado a que el contenido total de Zn en Andisoles de Costa Rica oscila entre 10 y 100 mg L^{-1} (Soto y González 1956, Alvarado y Mata 1993). De la misma manera, el Zn extraíble con HCl 0.1N en Andisoles también es bajo (1 a 16 mg L^{-1}) y aunque variable (Peralta *et al.* 1981) es más elevado en suelos cubiertos con pasto que bajo cultivos (Bornemisza y Peralta 1981).

Varios estudios muestran la respuesta de los cultivos a la aplicación de Zn en el campo, entre ellos café (Pérez, 1957), fresa (Salas *et al.* 1989), papa (Chaverri y Bornemisza 1977) y caña de azúcar (Chaves y Alvarado 1994). Mientras que la aplicación de Zn a plantas de maíz en invernadero afectó su crecimiento y contenido foliar (Marinho e Igue 1972), en campo la aplicación de 0 y 43.5 kg Zn ha^{-1} al cultivo de la papa no incrementó el rendimiento (Chaverri y Bornemisza 1977) y la adición de 25 kg Zn ha^{-1} (Micromate 35% Zn) elevó la producción de azúcar con menos materia prima (Chaves y Alvarado 1994). El contenido de Zn en forrajes que se considera adecuado es de 40 mg kg^{-1} de ración y el 60% de los pastos en fincas en Andisoles no alcanzan este valor. Durante la época seca el contenido foliar de Zn es de 35 mg kg^{-1}, valor que baja a 29 mg kg^{-1} durante la época lluviosa (Vargas y Fonseca 1989). En general, para suplir el Zn en Andisoles se realizan aplicaciones foliares del elemento empleando fuentes como sulfato de zinc, quelatos de Zn con EDTA, aminoácidos, proteínas, etc.

BORO

La disponibilidad de B en el suelo depende de factores como la textura, el pH, el contenido de materia orgánica y la humedad. El encalado, como complemento de los programas de fertilización, también se relaciona con la disponibilidad de B, pues reduce la mayor adsorción del elemento conforme el pH aumenta (Rímolo 1970).

La deficiencia de B en Andisoles fue identificada en café hace bastante tiempo (Peréz 1957), cuando se iniciaron experimentos para establecer relaciones entre niveles y producción (Pérez *et al.* 1956). Para el mismo cultivo, Ramírez (1998) encontró respuesta significativa a la aplicación de varios niveles de B al suelo, obteniendo la mayor producción con 40 kg B_2O_3 ha^{-1} fraccionado en tres épocas; las aplicaciones del elemento al final de la época lluviosa dieron mejor rendimiento y sobre niveles de 40 kg ha^{-1} los rendimientos disminuyeron al desplazarse la relación Ca/B hacia niveles de toxicidad. La importancia del B en la nutrición del café en Andisoles obliga a formular los fertilizantes comerciales con 0,3 a 0,7% de B.

En invernadero, no se encontró respuesta a la aplicación de B en Andisoles de Guanacaste, el y la Zona Sur (Bertsch y Cordero 1984, Hidalgo 1984) y a nivel de campo tampoco ha sido posible encontrar respuesta al elemento en fresa (Salas *et al.* 1989) y caña de azúcar (Chaves y Alvarado 1994). Cuando el nivel de B estuvo sobre 40 mg L^{-1}, Rodríguez *et al.* (1980) no encontraron respuesta a la aplicación de B en un Vitrandept.

MANGANESO

Los estudios con manganeso en Andisoles de Costa Rica demuestran la importancia del elemento en la nutrición de los cultivos, más por su toxicidad que por su deficiencia. La sensitividad de las variedades de café utilizadas anteriormente al exceso de Mn se reflejaba en una fuerte reducción de la cosecha, problema conocido como "café macho" y que se corregía por encalado cuando los suelos eran ácidos (Peralta 1952, Pérez 1957).

Varios factores afectan la disponibilidad de Mn en Andisoles, entre ellos el aumento en la cantidad de arcilla presente y el proceso de secado de la muestra (Fassbender y Roldán 1973), el porcentaje de materiales no cristalinos (Obando *et al.* 1984), la acidez del suelo y la profundidad a que se tome la muestra (Briceño y Gónzález 1980). El contenido total de Mn en Andisoles de Costa Rica oscila entre 0,10 y 0,13% (Alvarado y Mata 1993), mientras que el Mn soluble en agua se miden en trazas, el Mn intercambiable está entre 3,1 y 11,0 ppm y el Mn extraíble soluble reductante varió entre 9 y 200 ppm (Fassbender y Roldán 1973).

A pesar de que en estudios de invernadero se ha encontrado que después del N y del P el Mn es el tercer elemento más limitante para el crecimiento de las plantas (Salas 1979), otros estudios realizados en Andisoles no han encontrado respuesta a su aplicación (González 1980, Bertsch *et al.* 1984, Hidalgo 1985).

5. PROPIEDADES FÍSICAS Y SU MANEJO

DENSIDAD APARENTE

Una de las características que permite diferenciar los Andisoles de otros suelos del mundo es su baja densidad aparente, propiedad física que permite identificarlos fácilmente en el campo. Desde el punto de vista de mineralogía, los Andisoles pueden dividirse en tres grupos: 1) las cenizas volcánicas recién depositadas con densidades aparentes entre 1,1 y 1,4 Mg m^{-3}, 2) los suelos jóvenes en los cuales predomina la alofana en el complejo de arcilla y presentan densidades aparentes entre 0,3 y 0,7 Mg m^{-3} y 3) los más desarrollados en los cuales predominan la haloisita mezclada con alofana y tienen densidades aparentes que fluctúan entre 0,7 y 0,9 Mg m^{-3} (Forsythe 1974, Alvarado 1992).

Los valores de densidad aparente encontrados en Costa Rica varían entre 0,27 y 1,42 Mg m^{-3} (Luzuriaga 1970, Serfaty 1971, Guerrero 1974) lo que representa un ámbito amplio. Los valores bajos implican una alta porosidad a capacidad de campo (60-80%) y algunos de los valores altos pueden ser resultado de la compactación del suelo. La capa superficial de la serie Alajuela Plano, tiene una densidad aparente de 0,8 ± 0,07 y con compactación máxima el valor aumenta a 0,94 Mg m^{-3}.

RETENCIÓN DE HUMEDAD

Los Andisoles jóvenes predominan en áreas en las cuales la lluvia mantiene el suelo húmedo todo el año (3.000-4.000 mm año^{-1}) y tienen una alta capacidad volumétrica para retener el agua disponible (20 a 30%), definida como la diferencia de humedad estimada a 0,033 y 1,5 MPa en muestras conservadas a humedad de campo. Los Andisoles más desarrollados, en los cuales predomina la haloisita en el complejo de arcilla, se encuentran en áreas con estación seca definida y su capacidad volumétrica de retención de agua disponible fluctúa entre 18 y 25% para muestras conservadas a humedad de campo.

Varias propiedades físicas de los Andisoles cambian si la muestra se seca al aire o se conserva a humedad de campo. Cabe notar que un suelo al punto de marchitez permanente en el campo está en equilibrio con una humedad relativa de 98,4% mientras que seco al aire en bandejas puede someter el suelo a humedades relativas de hasta 30%, una situación drásticamente diferente.

Algunos Andisoles secados al aire previo a realizar los estudios de retención de humedad pierden algo de esa retención. Esta característica se mostró en los suelos Alajuela Plano, Alajuela Ondulado y Birrisito y en otros Andisoles (Forsythe 1972, Forsythe y Vásquez 1973). Debido a este fenómeno, se recomienda el análisis en muestras no alteradas, usando un modelo logarítmico de regresión para evaluar los valores estimados de humedad para una succión aplicada en ollas de presión (Forsythe 1972, 1985).

VELOCIDAD DE INFILTRACIÓN Y CONDUCTIVIDAD HIDRAÚLICA

Los Andisoles muestran alta velocidad de infiltración cuando no tienen capas endurecidas a poca profundidad. Los Andisoles de las series Alajuela Plano y Arenón Poasito en la Meseta Central de Costa Rica tienen velocidades de infiltración inicial (por inundación) entre 18-24 cm h^{-1} y de 36 cm h^{-1}, respectivamente y después de dos horas entre 6-10 cm h^{-1} y 9 cm h^{-1}, respectivamente (Forsythe 1974, Serfaty 1971). El U.S. Bureau of Reclamation (1953) considera que un suelo es de primera clase para irrigación por inundación si su velocidad de infiltración a las dos horas varía entre 2,0 y 6,4 cm h^{-1}. Suelos con promedios superiores a los 6,5 cm h^{-1} tienen clasificación baja, debido a la dificultad de obtener velocidad de avance del agua sobre la superficie satisfactoria y a la dificultad de controlar su flujo. Estos factores conllevan a una distribución deficiente del agua a lo largo de los surcos debido a penetración excesiva al comienzo del recorrido, con lo que la irrigación por inundación se hace difícil e ineficiente. Este fenómeno ocurre en los Andisoles mencionados, los cuales pueden ser irrigados por rociamiento o por inundación con surcos muy cortos. En Costa Rica, ambos sistemas de riego se utilizan en café, caña de azúcar y en hortalizas.

Los altos valores de infiltración por inundación y la alta conductividad hidráulica de los Andisoles pueden ser afectados por su manejo. En el primer año de un experimento de siembra de maíz y frijol en una plantación de laurel (*Cordia alliodora*) y cocobolo (*Dalbergia retusa*) de aproximadamente dos años de edad en el "Bajo San Lucas", CATIE, se encontró que a las profundidades de 0-19 cm y 19-43 cm, los valores de densidad aparente fueron de 0,68 ± 0,05 y 0,81 ± 0,7 Mg m^{-3} y los de la conductividad hidráulica fueron de 50,4 ± 35,4 cm

h $^{-1}$ y 31,7 ± 30,4 cm h^{-1}. Por esta razón, y a pesar de que la zona recibe 2.663 mm de precipitación anual, por lo que el factor de lluvia R de la Ecuación Universal de Erosión es de 122 (valor en el sistema métrico) y que la pendiente del lugar varió entre 39-69%, la pérdida máxima de suelo fue pequeña (1,72 toneladas $año^{-1}$) para el cultivo limpio de maíz y frijol (Forsythe *et al*. 1994).

ESTABILIDAD DE AGREGADOS

Hopgood (1999) estimó la estabilidad de agregados de 1 cm de diámetro en Andisoles de formación reciente provenientes de terrenos con diferente cobertura vegetal, aplicando una gota de agua por segundo durante un minuto desde una altura de 30 cm sobre el agregado colocado sobre una malla. De esta manera desarrolló una escala de estabilidad de agregados en la que el valor de 10 se asignó cuando no se encontraba dispersión visible, el valor de 5 a condiciones de mucha dispersión (quedando la mitad del agregado sobre la malla) y el valor de 1 cuando el agregado se dispersaba completamente. El autor encontró que la materia orgánica del suelo asociada a vegetación natural, ciprés, roble y pastura en el horizonte A aumentó la estabilidad de los agregados. En el horizonte subyacente (u horizonte C), con menos de 1% de materia orgánica, no se encontró ninguna estabilidad. El horizonte A (23 cm) se perdió por erosión cuando este consistía en una capa de ceniza fresca sin materia orgánica y no existía una cobertura de vegetación después de las erupciones del volcán Irazú (1963-1965). La materia orgánica desarrollada bajo *Pinus caribaea* no aumentó la estabilidad de los agregados.

SUPERFICIE ESPECÍFICA

La superficie específica total (SET) de la fracción arcillosa (menor de 2 μm) fue determinada por González (1972) utilizando el método de adsorción EGME (Ethylene glycol mono ethyl ether), encontrando en suelos con dominancia de geles de sílice valores de 170 $m^2 g^{-1}$; este valor es elevado y sugiere asimismo alta porosidad de partículas. Los geles de sílice más desarrollados tienen una superficie específica entre 200-400 $m^2 g^{-1}$ y cuando se asocian con materia orgánica los valores pueden llegar hasta 650 $m^2 g^{-1}$. El último valor es mayor que los datos publicados para este tipo de arcilla por diferentes autores (440-460 $m^2 g^{-1}$). En Andisoles más evolucionados (serie Birrisito) la superficie específica osciló entre 445-460 $m^2 g^{-1}$, valores menores a los encontrados en los suelos anteriores debido al alto porcentaje de gibbsita mezclada con alofana en estos suelos. Cuando la ceniza se meteoriza aún más (suelo Alajuela) los valores de la superficie específica oscilan entre 235 y 371 $m^2 g^{-1}$, siendo la arcilla dominante la metahaloisita.

Soto (1998) determinó, utilizando el método EGME, que la superficie específica de la fracción arcilla de 33 Andisoles de la vertiente sur del Volcán Irazú varió entre 19 y 298 $m^2 g^{-1}$ (promedio de 111 $m^2 g^{-1}$), con valores de 100 a 298 $m^2 g^{-1}$ a elevaciones mayores a los 2000 msnm.

Alvarado (1982) estudió la superficie específica total (arcilla, limo y arena sin destruir materia orgánica) de varios Andisoles de Guatemala y Costa Rica utilizando la técnica de adsorción de nitrógeno en un punto único, encontrando valores que oscilaron desde 1 hasta 292 $m^2 g^{-1}$. Estos valores son bajos para Andisoles puesto que en Japón (Rousseaux y

Warkentin 1976) con muestras a humedad de campo mencionan valores entre 100 y 400 $m^2 g^{-1}$, los cuales se reducen a la mitad cuando las muestras se secan al aire. Alvarado (1982) encontró que los suelos con menos de un 10% de arena tienen una superficie específica total (SET) que oscila entre 42 y 94 $m^2 g^{-1}$. Curiosamente, un suelo con 84% de arena tiene un SET de 292 $m^2 g^{-1}$ y otro con 77,1% de arena tiene una SET de 212 $m^2 g^{-1}$. Esta tendencia se atribuyó a la alta microporosidad de los "agregados de arena" o "seudo-arenas" (Rosseaux y Warkentin 1976).

MANEJO DE LA ACIDEZ Y ENCALADO DE LOS SUELOS

Eloy Molina

1. CAUSAS Y FUENTES DE LA ACIDEZ DEL SUELO

El origen de la acidez del suelo depende de varios factores que involucran desde la génesis del suelo hasta el manejo del mismo (Cuadro 1). Una de las causas principales de la acidez del suelo en muchas regiones tropicales es debido a que los suelos son muy viejos. A través de millones de años estos suelos han sido sometidos a una intensa meteorización, ayudados por algunos de los factores formadores de suelos como el clima y el relieve. El ambiente húmedo y cálido característico de muchas regiones tropicales causa la lixiviación o remoción de nutrimentos como calcio, magnesio y potasio de la capa superficial del suelo, los cuales son gradualmente remplazados por iones ácidos como aluminio, hierro, manganeso e hidrógeno. Este fenómeno se presenta aún en suelos de regiones áridas o semiáridas, en donde la formación de suelos muy viejos y meteorizados ocurrió como consecuencia del clima húmedo y el ambiente de lixiviación que hubo en algún momento de su historia.

La acidez de los suelos también puede ser causada por los iones ácidos que se liberan de la descomposición de la materia orgánica. La descomposición de los residuos de plantas y animales depositados en el suelo forma compuestos ácidos. Este proceso es importante en suelos con altos contenidos de materia orgánica, como en el caso de Histosoles y algunos Andisoles, o en suelos que reciben grandes volúmenes de residuos orgánicos. Sin embargo, el papel que cumple la materia orgánica se basa principalmente en reducir el pH del suelo. Se ha demostrado que uno de los efectos benéficos de la materia orgánica es su capacidad para formar complejos con el aluminio y el manganeso, disminuyendo de esta forma la concentración de estos elementos en la solución del suelo y su efecto fitotóxico en los cultivos.

Los suelos pueden llegar a ser ácidos por el manejo del hombre. El cultivo intensivo del suelo causa la remoción de grandes cantidades de nutrimentos como calcio, magnesio y potasio, a través de la cosecha. Algunos cultivos como el banano, la caña de azúcar, la palma aceitera, las hortalizas de fruta, etc, producen un alto tonelaje de biomasa que contiene una gran cantidad de nutrimentos, muchos de los cuales son removidos del suelo a través de la cosecha. Las plantas cultivadas también pueden contribuir a incrementar la acidez de los suelos, ya que al absorber cationes liberan iones hidrógeno para mantener el equilibrio en su interior, lo que contribuye a la reducción del pH del suelo.

Algunos fertilizantes nitrogenados amoniacales pueden acidificar el suelo debido a que la conversión de amonio a nitrato por nitrificación libera hidrógenos (cuadro 2). Este proceso también se cumple con el nitrógeno proveniente de estiércol de ganado y otros abonos orgánicos. Fertilizantes como el sulfato de amonio, urea y nitrato de amonio, cuando son aplicados al suelo, se disocian liberando amonio (NH_4^+). Esta forma de nitrógeno se convierte en nitrato (NO_3^-) a través de la oxidación biológica o nitrificación produciendo un exceso de H^+ que acidifica el suelo. La aplicación intensiva de fertilizantes

también puede incrementar la lixiviación de Ca y Mg debido a que éstos nutrimentos sólo se mueven cuando van acompañados de un anión como el NO_3^- o SO_4^-.

Otros factores que contribuyen a incrementar la acidez del suelo son la contaminación por lluvia ácida y los problemas de erosión del suelo. Quizás el primero no es tan importante en Costa Rica por no ser un país con gran cantidad de industrias. Pero la erosión del suelo si es un problema de gran magnitud en nuestro país que causa la pérdida de la capa arable que normalmente es la más rica en nutrimentos y materia orgánica, lo cual contribuye a agravar los problemas de acidez en los suelos.

Cuadro 1. Origen de los problemas de acidez de suelo

CAUSA	EFECTO
Suelos viejos	Pérdida de nutrimentos básicos por lixiviación y acumulación de iones ácidos
Materia orgánica	Liberación de hidrógeno por descomposición microbiana de M.O.
Cultivo	Remoción de nutrimentos en productos cosechados que disminuyen fertilidad de suelo
Fertilizantes nitrogenados amoniacales	Nitrificación de amonio a nitrato libera acidez residual
Contaminación	Lluvia ácida
Erosión	Pérdida de suelo y disminución de fertilidad

Cuadro 2. Acidez residual producida por fertilizantes nitrogenados (Tisdale et al. 1993)

Fuente	N (%)	Reacción de nitrificación	Índice Acidez
Urea	46	$(NH_2)CO + 4O_2 \longrightarrow 2H^+ + 2NO_3^- + CO_2 + H_2O$	- 84
Nitrato de amonio	33,5	$NH_4NO_3 + 2O_2 \longrightarrow 2H^+ + 2NO_3^- + H_2O$	- 63
Sulfato de amonio	21	$(NH_4)_2SO_4 + 4O_2 \longrightarrow 4H^+ + 2NO_3^- + SO_4^{-2} + 2H_2O$	- 112
Fosfato monoamónico	12	$NH_4H_2PO_4 + O_2 \longrightarrow 2H^+ + NO_3^- + H_2PO_4^- + H_2O$	- 65
Fosfato diamónico	18	$(NH_4)_2HPO_4 + O_2 \longrightarrow 3H^+ + 2NO_3^- + H_2PO_4^- + H_2O$	- 74

Indice de Acidez Fisiológica= (-) kg $CaCO_3$/100 kg fertilizante

2. SUELOS ÁCIDOS DE COSTA RICA

Los problemas de acidez de suelos están distribuidos en muchas zonas de importancia agrícola en el país con características físico-químicas muy variables que inciden en su fertilidad y manejo. Algunas limitaciones comunes de fertilidad de suelos fueron cuantificadas por un estudio realizado por Bertsch (1986), en el que se indica que el 35% de los suelos del país son bajos en Ca y Mg, en tanto que la acidez del suelo es un problema importante entre el 20 y 30% de los suelos. Otros problemas como deficiencias de N y P son también de gran importancia en suelos ácidos, y a menudo la eficiencia de la respuesta a la aplicación de fertilizantes con estos elementos se ve reducida por la presencia de alta acidez que limita el crecimiento radical de las plantas. A nivel taxonómico, los órdenes de suelos que presentan los problemas más serios de acidez se conocen como Ultisoles, Andisoles e Inceptisoles (Dystrudepts y Dystrustepts) (Molina, 1998). A continuación se presentan algunas características de los dos primeros.

2.1 Andisoles

La fertilidad de estos suelos es de moderada a baja, y existen diferencias importantes dependiendo del origen de las cenizas. A modo de ejemplo, los Andisoles derivados del Volcán Poás son bajos en bases, en tanto que los del Volcán Irazú presentan contenidos medios de Ca y Mg. El pH oscila entre 5 y 6, aunque en suelos muy cultivados y abonados con N, el pH puede disminuir por debajo de 5, debido a el efecto acidificante de los fertilizantes nitrogenados. Tal es el caso de algunos Andisoles de Naranjo, Grecia y Poás cultivados de café. Sin embargo, en términos generales la acidez intercambiable es moderada y no es limitante para el crecimiento de las plantas. La mayor parte de la acidez en estos suelos es proveniente de H, siendo el Al poco importante, quizás con excepción de suelos que han sido intensamente cultivados y fertilizados con nitrógeno y en los cuales no se ha hecho un manejo adecuado del encalado. Es frecuente encontrar valores menores de 1 cmol(+) L^{-1} de acidez. El encalado para reducir la acidez por lo general no es tan importante, y esta práctica se recomienda principalmente para mejorar los contenidos de Ca y/o Mg.

2.2 Ultisoles

Este es el grupo de suelos que con mayor frecuencia presenta los problemas más serios de acidez. La fertilidad de Ultisoles oscila entre moderada a pobre, debido a los bajos contenidos de Ca y Mg, y la predominancia de Al intercambiable y alta saturación de Al en el complejo de cambio. El contenido de Al intercambiable con frecuencia es superior a 1 cmol(+)/L. El pH varía desde ácido a fuertemente ácido, y la capacidad de intercambio catiónica también es baja como consecuencia de la presencia de arcillas de baja actividad iónica, y de concentraciones bajas de materia orgánica. En muchos Ultisoles del país la toxicidad de Al es un problema serio para el crecimiento de cultivos sensibles, especialmente por su efecto adverso sobre la raíz. La presencia de una alta saturación de Al también reduce la disponibilidad de P y la absorción de otros nutrimentos como N, Ca, y Mg.

3. MANEJO DE LA ACIDEZ DEL SUELO

No existe una estrategia única del control de la acidez del suelo debido a las características particulares de cada grupo de suelos. Dado que existen muchos factores que están involucrados, la corrección de la acidez del suelo debe plantearse como una solución integral en el que están incluidos el uso de enmiendas, las propiedades físicas y químicas del suelo, el manejo de la nutrición, la materia orgánica, el cultivo, etc. A continuación se discuten algunos de los factores de manejo más importantes para el control de la acidez.

2.2 Encalado

El encalado es el método más común y efectivo para corregir la acidez del suelo, y consiste en la aplicación masiva de sales básicas con el objeto de neutralizar la acidez causada por hidrógeno y aluminio (Molina, 1998). La cal aplicada al suelo causa una serie de reacciones químicas que elevan el pH y disminuyen la acidez, reduciendo las concentraciones de aluminio e hidrógeno a niveles no tóxicos para las plantas.

La reducción de la acidez y la toxicidad de aluminio mejora el crecimiento de las raíces de las plantas permitiéndoles profundizar más en el perfil del suelo y explorar un mayor volumen de suelo en busca de agua y nutrimentos. Se ha comprobado que un buen crecimiento del sistema radical está directamente relacionado con un mayor desarrollo de biomasa aérea, un aumento en la producción, y un mejoramiento en la sanidad de la planta.

El uso del encalado para la corrección de la acidez del suelo debe considerar varios factores como: fuente de cal, calidad del material, dosis a aplicar y método de aplicación.

2.2.1 Fuentes de encalado

La roca caliza, calcárea o calcita está compuesta principalmente de carbonato de calcio ($CaCO_3$), siendo el material más utilizado para la corrección de la acidez del suelo debido a que es un producto natural que se encuentra en casi todas partes. Se origina a partir de los restos de organismos marinos cuyas secreciones formaron carbonatos de calcio y/o magnesio, los cuales se depositaron como sedimentos endurecidos en antiguos mares, y que hoy se encuentran como yacimientos de roca caliza en montañas, planicies, valles y en áreas cercanas a las costas. Otros materiales como el óxido de calcio (cal viva) se obtiene a partir de la calcinación total de la roca caliza a alta temperatura, y el hidróxido de calcio (cal apagada) a partir del humedecimiento y posterior secado del mismo óxido.

La cal dolomítica contiene carbonatos de calcio y magnesio, lo que la hace más atractiva que la cal calcítica debido a que la mayoría de los suelos ácidos son deficientes en magnesio. Sin embargo, su uso en cultivos del país es limitado por su alto costo de transporte ya que debe ser importada de otros países. Otro material importado es el óxido de magnesio, conocido también como Magox, y en su forma pura contiene 60% de Mg. Es una fuente excelente en suelos ácidos con problemas de Mg, siendo su capacidad de neutralización de la acidez mucho más elevada que la de otros materiales (Cuadro 3). Otros productos neutralizantes de la acidez del suelo incluyen la magnesita ($MgCO_3$), escorias industriales (silicatos de Ca y Mg), arcillas calcáreas, etc., (Espinoza y Molina, 1999).

2.2.2 Calidad

Cuando se selecciona un material de encalado hay dos factores importantes de considerar que determinan su grado de reactividad: pureza química y fineza. La reactividad se refiere a la capacidad del material para neutralizar la acidez del suelo y varía de acuerdo con la composición química y el tamaño de partículas del producto. La composición química del material de encalado indica la cantidad de acidez que puede neutralizar, para lo cual se utiliza el carbonato de calcio como estándar, con un valor de neutralización de 100%. Este valor se conoce como Equivalente Químico de carbonato de calcio (EQ_{CaCO3}), y el poder de neutralización de acidez de todos los materiales se expresa como EQ_{CaCO3}. Los óxidos e hidróxidos de Ca y Mg son más concentrados en estos elementos que los carbonatos, por lo que sus EQ son más altos (Cuadro 3).

El grado de fineza o tamaño de partículas indica la velocidad con la cual el material de encalado puede neutralizar la acidez del suelo. La fineza del material se mide pasando la cal a través de una secuencia de cribas o zarandas de diferente diámetro (10-60 mesh). La cal retenida en malla 10 es muy gruesa y no tienen efecto en neutralizar la acidez, en tanto que la cal que pasa la malla de 60 mesh es muy fina y tiene una Eficiencia Granulométrica (EG) de 100% en neutralizar la acidez del suelo (Molina, 1998). Con el resultado de la composición química (EQ) y la fineza del material (EG), es posible calcular el Poder Relativo de Neutralización Total (PRNT), mediante la fórmula:

$$\% \text{ PRNT} = \frac{\% \text{ EG} \times \% \text{ EQ}}{100}$$

El PRNT indica el % de Equivalente Químico de la cal que es capaz de reaccionar en un lapso de 3 meses. Al conocer este índice es posible ajustar la dosis de cal a emplear de acuerdo con su grado de calidad, entre más alto el valor del PRNT, mayor es su efecto neutralizante de la acidez del suelo (Espinoza y Molina, 1999).

3.1.3 Método y época de aplicación

La forma más efectiva de aplicación de cal es la incorporación del material en los primeros 15 a 20 cm de suelo para asegurar un contacto máximo del producto con el suelo en la capa arable. La mayoría de los materiales de encalado son poco solubles en agua, por lo tanto, la completa incorporación en el suelo es muy importante para que la cal reaccione completamente. La incorporación con arado o rastra permite la mezcla del material con la capa del suelo donde se concentran las raíces de la mayoría de los cultivos. Se ha demostrado que las aplicaciones de cal incorporadas son más eficientes, especialmente si el suelo es arcilloso.

La distribución es otro aspecto muy importante. Si la cal es incorporada con arado, ésta debe distribuirse en forma uniforme en todo el terreno. En cultivos ya establecidos, como pastos y perennes, la cal debe aplicarse en la superficie. La cal aplicada en la superficie reacciona más lentamente y en forma incompleta en comparación con la cal incorporada

completamente en el suelo, por lo tanto estos suelos deben ser reencalados con mayor frecuencia. En cultivos perennes con distancias de siembra amplias, la cal debe distribuirse en el área de gotera o rodaja, que es donde se concentran las raíces. La cal aplicada en la superficie reacciona más lentamente y en forma incompleta en comparación con la cal incorporada completamente en el suelo, por lo tanto estos suelos deben ser reencalados con mayor frecuencia.

En cultivos perennes con distancias de siembra amplias, la cal debe distribuirse en el área de gotera o rodaja, que es donde se concentran las raíces. En cultivos perennes también resulta muy práctico incorporar un poco de cal en el hoyo de siembra antes de poner la planta, y otro poco en la rodaja. Normalmente, el suelo en la banda de fertilización tiende a ser más ácido debido al efecto residual de los fertilizantes nitrogenados, por lo que la aplicación de la cal en ese sitio es una medida eficaz.

En vista que la cal requiere de humedad para que reaccione, la época más apropiada para aplicarla es al inicio de las lluvias o un poco antes. En café es usual que la cal se agregue en marzo o en abril en el Valle Central. Sin embargo, no existen limitaciones en cuanto a la época de aplicación siempre que haya humedad en el suelo y que no coincida con un ciclo de fertilización al suelo.

Cuadro 3. Fuentes comunes de cal

MATERIAL	CARACTERÍSTICAS	Equivalente Químico %	Ton ha^{-1} = 1 ton ha^{-1} de $CaCO_3$ puro
Cal calcítica	La mayoría es $CaCO_3$, fuente más común y accesible	75-100	1,3-1,0
Óxido de calcio	Cal viva (CaO), de rápida reacción neutralizante, para cultivos de ciclo corto, poco efecto residual, más caro que carbonatos, difícil de manipular (cáustico).	120-175	0,8-0,6
Hidróxido de calcio	Cal apagada $Ca(OH)_2$, de rápida acción, cultivos de ciclo corto, poco efecto residual, más caro.	110-135	0,9-0,7
Dolomita	Carbonato de calcio y magnesio, contiene 30-50% $MgCO_3$, fuente de Mg, más caro que carbonatos	95-100	1,1-0,9
Magnesita	Carbonato de magnesio ($MgCO_3$), contiene casi exclusivamente Mg, efecto neutralizante ligeramente superior al $CaCO_3$, importado de Guatemala	100-120	1,0-0,8
Óxido de magnesio	MgO, alto poder neutralizante, rápida acción, contiene casi exclusivamente Mg, excelente fuente de Mg	175-240	0,6-0,4

En siembras nuevas la cal debe ser incorporada antes de sembrar. Una vez aplicada la cal, se debe esperar un tiempo prudencial (1 mes) para que reaccione antes de añadir el fertilizante. El contacto directo de la cal con fertilizantes nitrogenados amoniacales en la superficie del suelo puede favorecer la formación de carbonato de amonio, el cual a su vez se transforma en amoníaco y se pierde el N por volatilización. También el contacto con fertilizantes fosfatados causa pérdidas del elemento por formación de fosfatos de calcio insolubles.

3.1.4 Dosis de cal

Existe una gran diversidad de suelos en los trópicos y por esta razón no se pueden hacer recomendaciones generales de encalado. Los suelos dominados por minerales arcillosos de tipo 2:1 (montomorillonita, vermiculita, illita) que predominan en regiones templadas pero que también están presentes en zonas tropicales y subtropicales, se comportan en forma diferente de los típicos suelos tropicales rojos (Ultisoles, Oxisoles e Inceptisoles dístricos dominados por mineralogía de arcillas de óxidos e hidróxidos de Fe y Al y caolinita) y de los suelos derivados de cenizas volcánicas (Andisoles) (Espinoza y Molina, 1999).

El establecimiento de la dosis de cal se facilita con en el uso de resultados de análisis de suelos porque permiten determinar el pH, los contenidos de Ca, Mg, K y acidez intercambiable, la Capacidad de Intercambio Catiónica Efectiva (CICE), y el % de saturación de acidez. En suelos ácidos tropicales con carga permanente dependiente de pH la mayor parte de la acidez provienen del Al, por lo que generalmente se habla de acidez intercambiable ($Al^{+3} + H^{+}$) y aluminio intercambiable como si fueran sinónimos. La acidez o Al intercambiable se determina mediante la extracción del suelo con una sal neutra no tamponada, tal como el KCl 1N, y la titulación del extracto con una base. Esta fracción constituye el aluminio e hidrógeno intercambiable y el de la solución del suelo que pueden perjudicar el crecimiento de las plantas. Los requerimientos de encalado en suelos rojos de los trópicos se basan en el uso de la acidez intercambiable y el % de saturación de acidez, en tanto que en suelos con arcillas 2:1 de zonas templadas se utiliza el criterio de encalar hasta elevar el pH cerca o hasta la neutralidad (Bertsch, 1995). En términos generales se puede indicar al menos cuatro criterios para definir requerimientos de encalado: pH, contenido de acidez o Al intercambiable, % de saturación de acidez, y suministro de Ca y/o Mg.

a) Requerimientos de encalado por el método de pH

Este procedimiento es el más utilizado en suelos de regiones templadas y aplicable en suelos con mineralogía de arcillas 2:1, con carga permanente independiente de pH. Estos suelos, por tener arcillas de baja reactividad, pueden encalarse con facilidad hasta llegar a pH 6.5-7. Uno de los métodos más comunes para determinar las necesidades de encalado en suelos de carga permanente es la solución tampón SMP (Schoemaker, Mclean y Pratt, 1961). En este método se pone en equilibrio una suspensión de muestras de suelo con agua y solución tampón, y se determina la disminución del pH de la solución tampón resultante, el cual se correlaciona con la cantidad de cal necesaria para elevar el pH a un valor de 6,8 determinada por incubación con $CaCO_3$ de las mismas muestras de suelo. De este modo se obtiene una curva de calibración con cuyos datos se puede construir una tabla

de recomendación que determina la cantidad de cal necesaria para lograr determinado pH. Este método no es recomendado en suelos ácidos tropicales con mineralogía de carga variable porque llega a estimar cantidades muy altas de cal que no son necesarias. Uno de los problemas potenciales de encalar un suelo hasta un pH cercano a 7 es el de inducir deficiencias de micronutrimentos, particularmente de boro, zinc y manganeso.

b) Requerimientos de encalado por contenido de acidez o Al intercambiable

El uso de la acidez o Al intercambiable como criterio para determinar requerimientos de encalado fue propuesto por Kamprath (1970) en suelos ácidos tropicales de carga variable. El Al es el factor tóxico en muchos suelos minerales ácidos, y la finalidad del encalado es eliminar la toxicidad de Al como factor limitante para el crecimiento de los cultivos. Con este procedimiento, la cantidad de cal a agregar se calcula como una proporción química equivalente a 1,5 a 3 veces la cantidad de acidez o Al intercambiable extraído con una solución no tamponada de KCl 1 M. Estudios realizados en Oxisoles y Ultisoles han mostrado que para neutralizar todo el Al intercambiable se debe aplicar la cal en cantidades químicamente equivalentes en promedio a dos veces la cantidad de Al intercambiable (Cuadro 4).

Cuadro 4. Factor de encalado (cmol Al(+)/L x factor) requerido para dar equivalentes de carbonato de calcio para reducir la saturación de Al a menos del 10%. (Kamprath, 1980)

Area	Suelo 15 cm	pH inicial	Al cmol(+)/L	Saturación de Al %	Factor	pH final
Brasil	Oxisol	4,0	0,7	70	3	4,9
Brasil	Oxisol	4,4	0,9	75	2	5,5
Brasil	Ultisol	4,0	1,9	86	2	5,0
Colombia	Oxisol	4,3	3,5	78	2	5,3
Panamá	Ultisol	5,1	1,2	53	1,5	5,9
Panamá	Ultisol	5,0	3,0	64	1,5	6,0
USA	Ultisol	4,5	0,9	82	2,0	5,9
USA	Ultisol	4,7	1,0	78	2,0	6,0
USA	Ultisol	4,5	2,3	73	1,5	5,7
USA	Ultisol	4,7	4,2	54	1,5	5,6
India	--	<5,0	--	--	2,0	5,3
Sudáfrica	Oxisol	<5,0	--	--	3,0	--
Promedio					**2,0**	

Como regla general, el cálculo de los requerimientos de encalado en ton ha^{-1} para una profundidad de 0 a 20 cm de suelo se hace multiplicando los cmol(+) L^{-1} de Al o acidez intercambiable por 2. Las dosis calculadas por este método neutralizan del 85 a 90% del Al intercambiable en suelos con 2 a 7% de materia orgánica. En suelos con contenidos más altos de materia orgánica, el factor debe subirse a 2,5 ó 3 debido a la presencia de hidrógeno intercambiable, y a que es probable que existe mucho más Al intercambiable acomplejado

con la materia orgánica y que no es extraído por el KCl. Este método no considera el grado de tolerancia del cultivo a la acidez del suelo, sino que se basa en el principio de neutralizar todo el Al intercambiable, por lo que en muchos casos podría inducir a recomendar dosis muy altas de cal. El procedimiento propuesto por Kamprath puede ser útil en suelos con rango de Al intercambiable entre 0,5 y 2 cmol(+) L^{-1}, en suelos con problemas de toxicidad de Mn, en suelos con contenidos de Al intercambiable > 0,5 cmol(+) L^{-1} pero con saturación de Al inferior al 20%, en cultivos muy sensibles a la acidez del suelo, y en cultivos de alto valor económico.

c) Requerimientos de encalado por % de saturación de acidez

En el caso de cultivos con cierta tolerancia a la acidez no es necesario precipitar todo el Al como lo establece el método de Kamprath, pudiendo utilizar cantidades menores de cal que sólo reduzcan la saturación de Al a los valores requeridos por el cultivo. En este caso se utiliza el criterio del % de saturación de acidez o Al, el cual se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$\% \text{ Saturación de acidez} = \frac{\text{acidez (cmol (+)/L)}}{\text{acidez + Ca + Mg + K (cmol(+)/L)}} \times 100$$

La saturación de acidez es una medida del % del complejo de intercambio catiónico que está ocupado por aluminio e hidrógeno. El valor del % de saturación de Al o acidez intercambiable es el mejor criterio para diagnosticar problemas de acidez. Cada cultivo, variedad o cultivar tiene su grado de tolerancia a la acidez, lo cual depende de las características genéticas de la planta. Sin embargo, en términos generales se puede indicar que casi ningún cultivo soporta más de 60% de saturación de acidez, y el valor deseable para la mayoría de las plantas oscila entre 10 y 25% (Bertsch, 1995). Si se conoce el % de saturación de Al tolerado por el cultivo o la variedad, es posible entonces utilizar una fórmula sencilla para estimar las necesidades de encalado, o bien se puede reducir la saturación de Al a un nivel óptimo de 20% o menos. Existen varias alternativas para calcular los requerimientos de cal con base en el procedimiento del % de saturación de Al, quizás una de las más prácticas es el método combinado (Espinoza y Molina, 1998).

$$\text{ton } CaCO_3\ ha^{-1} = \frac{1.5\ (Al - RAS)\ (C\ I\ C\ E)}{100} \times f$$

Al = % de saturación de acidez existente en el suelo
RAS = % de saturación de acidez deseado
CICE = Capacidad de intercambio catiónico efectiva
f = 100/PRNT
PRNT = Poder Relativo de Neutralización Total
PRNT = Equivalente Químico x Eficiencia Granulométrica/100

Esta fórmula toma en consideración el % de saturación de acidez original del suelo y el valor deseable que debería tener, multiplicado por un factor constante, e incluye el factor f de eficiencia del material encalante. La constante de 1,5 toma en cuenta la neutralización del Al no intercambiable que no es determinado por el KCl, las correcciones de peso/volumen para ajustar el encalado a la profundidad de incorporación, y la neutralización de nuevos puntos de carga negativa generados en muchos coloides en medios básicos al ionizar su OH terminales.

Este procedimiento es útil para suelos con saturación de acidez intercambiable de 30% o superior. En suelos con saturación de Al inferior a 30%, la fórmula no sería aplicable porque podría dar resultados con valores negativos e incongruentes, o podría estimar dosis de cal muy pequeñas que no son prácticas de aplicar.

d) Requerimientos de encalado para el suministro de Ca y/o Mg

En algunos suelos los problemas de acidez son más bien moderados y la limitante está más enfocada a la presencia de bajos contenidos de Ca y Mg. Tal es el caso de muchos Andisoles con pH ligeramente ácido y contenido de Al intercambiable inferior a 0,5 cmol(+) L^{-1}. También es posible encontrar un problema similar en algunos Entisoles y suelos aluviales de texturas arenosas y formados a partir de materiales parentales bajos en bases. En estos casos el uso del encalado puede ser necesario para el suministro de Ca y/o Mg, y los procedimientos de estimación de dosis mencionados anteriormente no son válidos en estos suelos. Los materiales de encalado constituyen también una fuente de bajo costo para suplir Ca y Mg como fertilizante, y para incrementar los contenidos de estos elementos en los suelos en una forma sostenible y duradera. El criterio que se debe utilizar es de aplicar una dosis moderada de cal, que puede oscilar entre 0,5 y 1 ton ha^{-1}, dependiendo del objetivo que se pretende alcanzar en el incremento del contenido de bases en el suelo. Para esto es útil indicar que 1 cmol(+) L^{-1} de Ca equivale aproximadamente a 1 ton ha^{-1} de $CaCO_3$ de buen grado de pureza química (EQ>90%); 1 ton ha^{-1} de dolomita equivale aproximadamente a 0,5 cmol(+) L^{-1} de Ca y 0,5 cmol(+) L^{-1} de Mg; 1 ton ha^{-1} de óxido de magnesio de 80% de MgO equivale aproximadamente a 2 cmol(+)Mg L^{-1}.

3.2 Mejoramiento del subsuelo

En muchos casos, las reacciones benéficas de la cal ocurren sólo en la capa superficial del suelo donde se incorporó (0 a 20 cm). Debido a la baja movilidad de la cal, la acidez del subsuelo en la mayoría de los suelos no puede ser neutralizada por las aplicaciones de cal en el horizonte superficial. Condiciones de bajo contenido de Ca y alto nivel de Al intercambiable en el subsuelo pueden limitar el crecimiento y profundización de las raíces del cultivo.

La incorporación superficial de yeso ($CaSO_4.2H_2O$) ha demostrado ser una alternativa eficaz para mejorar la fertilidad de subsuelos ácidos, debido a que este material promueve el desplazamiento de Ca y otros cationes hacia horizontes más profundos del suelo. La acción del yeso se produce a través de la saturación del complejo de cambio con Ca, que desplaza cationes a la solución del suelo y parte del mismo Ca, los cuales están sujetos a ser lixiviados por el agua de infiltración.

El SO_4^{-2} también sufre reacciones de intercambio y adsorción y es susceptible a lixiviarse, arrastrando consigo a los cationes desplazados a la solución del suelo, hacia los horizontes subsuperficiales mediante la formación de pares iónicos neutros como $CaSO_4$, $MgSO_4$ y K_2SO_4. Esta lixiviación puede mejorar la fertilidad del subsuelo, enriqueciéndolo con Ca, Mg, K y S. La utilización del yeso promueve el desarrollo del sistema radicular en el subsuelo. Un sistema radicular que crece vigorosamente a mayor profundidad aprovecha mejor el agua disponible y permite que el cultivo resista mejor las épocas secas, y habilita a la planta explorar un mayor volumen de suelo que favorece la absorción de nutrimentos.

3.3 Mejoramiento de la nutrición

Los suelos ácidos con frecuencia son deficientes en otros nutrimentos como N, P, S, Zn, B y Mo. El suministro de estos elementos a través de un adecuado programa de fertilización es una práctica necesaria que complementa el efecto benéfico del encalado. Muchos Ultisoles y Andisoles presentan contenidos de P extremadamente bajos, y su capacidad de fijación de P es muy alta. Las aplicaciones de P localizadas mejoran la respuesta del cultivo en estos suelos. El encalado mejora la respuesta a la aplicación de fertilizantes en suelos ácidos. Esto se debe fundamentalmente a las mejores condiciones físicas y químicas que el suelo adquiere después de la aplicación de cal, produciendo un mejor ambiente para el desarrollo radicular.

3.4 Mejoramiento de la materia orgánica del suelo

El mejoramiento de la materia orgánica es una práctica de manejo que brinda excelentes resultados en suelos ácidos, especialmente en Ultisoles y Oxisoles. La materia orgánica suministra nutrimentos, aumenta la capacidad de intercambio catiónico, conserva la humedad del suelo, mejora la estructura, y promueve el desarrollo de organismos benéficos como las hormigas, lombrices, bacterias fijadoras de N, etc. La incorporación de abonos orgánicos, residuos de cosecha, barbechos y abonos verdes tiene un efecto favorable en suelos ácidos. Otras prácticas agrícolas que ayuden a conservar la materia orgánica del suelo como la rotación de cultivos, siembra con cero o mínima labranza, cultivos de cobertura y prevención de la erosión, tienen gran impacto en el manejo sostenible de muchos suelos ácidos.

La materia orgánica tiene efecto sobre la acidez del suelo mediante la formación de complejos con Al y Mn y de esta manera hace disminuir el contenido de estos elementos en la solución del suelo. La aplicación de abonos orgánicos y residuos de cosecha de rápida mineralización contribuye a disminuir la toxicidad de Al en suelos ácidos, además de los otros efectos benéficos ya mencionados.

3.5 Uso de variedades tolerantes a acidez

Existe un número considerable de especies de plantas de importancia económica que se consideran tolerantes a condiciones de suelos ácidos. La mayoría de éstas tienen su origen en regiones de suelos ácidos, lo cual indica que la adaptación a los factores edáficos limitantes forma parte del proceso evolutivo. Algunas variedades de ciertas especies también poseen tolerancia a la acidez, aunque la especie en general no la tenga. Estas

variedades probablemente han sido seleccionadas involuntariamente por agricultores o cultivadores debido a su comportamiento superior en condiciones de suelos ácidos (Sánchez y Salinas, 1981). El uso de variedades resistentes a alta concentración de Al y/o Mn ha sido una práctica de manejo eficaz en suelos ácidos, especialmente para agricultura de bajos insumos donde la aplicación de dosis altas de fertilizantes y enmiendas es muy limitada debido a los costos elevados y el bajo nivel de tecnología empleado. En el cuadro 5 se presenta una lista de especies de cultivos que poseen un grado significativo de tolerancia a la acidez del suelo.

Cuadro 5. Cultivos considerados generalmente como tolerantes a acidez del suelo.

Yuca	Papa	Granadilla
Frijol	Caña de azúcar	Maracuyá
Caupí	Plátano	Piña
Guisante	Café	Coco
Gandul	Naranja	Pejibaye
Frijol lima	Lima	Palma aceitera
Frijol mungo	Marañón	Banano
Maní	Mango	Pimienta
Arroz	Guayaba	Cacao
Trigo	Carambola	

Nota: puede haber diferencias importantes entre variedades dentro de un mismo cultivo.

4. BIBLIOGRAFIA

Alcarde, J.C. 1988. Contraditória, confusa e polemica : é a situacao do uso do gesso na agricultura. Informacoes Agronomicas. POTAFOS 41:1-3

Alcarde, J.C. 1992. Corretivos da acidez dos solos: características e interpretacoes técnicas. Anda, Sao Paulo, Brasil. Boletim Técnico Nº 6. 26 p.

Barber, S. 1984. Liming materials and practices. In Soil Acidity and Liming. Ed. por F. Adams, Wisconsin, ASA p. 171 - 209.

Bertsch, F. 1986. Manual para interpretar la fertilidad de los suelos de Costa Rica. San José, Universidad de Costa Rica. 86 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.

Caudle, N. 1991. Managing Soil Acidity. Raleigh, North Carolina, Tropsoils Publications. 28 p.

Carballo, L.; Molina, E. 1993. Caracterización física y química de materiales de encalado en Costa Rica. Agronomía Costarricense 17(2):105-110.

Chaves, M. 1991. Características y uso potencial del yeso en la agricultura costarricense. Revista Colegio de Ingenieros Agrónomos. (Costa Rica) Nº 7:18-20.

Chaves, 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. 41 p.

Espinosa, J; Molina, E. 1999. Acidez y encalado de los suelos. Quito, Ecuador, INPOFOS. 42 p.

Kamprath, E.J. 1970. Excahangeable aluminun as a criterion for liming leached mineral soils. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 24: 252-254.

Kamprath, E.J. 1984. Crop response to lime on soils in the tropics. In Soil Acidity and Liming. Ed. por F. Adams, Wisconsin, ASA. p. 349-369.

Inpofos. 1997. Manual Internacional de Fertilidad de Suelos. Quito, Ecuador, Instituto de la Potasa y Fosfato.

Malavolta, E. 1993. Nutricao mineral e adubacao do caffeiro. Colheitas economicas máximas. Sao Paulo, Brasil, Ed. Ceres. 210 p.

Molina, E. 1998. Encalado para la corrección de la acidez del suelo. San José, Costa Rica, Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo. 45 p.

Nicholaides, J.J. 1993. Liming Materials: origin, composition, use and effects. In CRC Handbook Of Nutritional Supplements, Vol. II. ed. por M. Recheigl, Florida. CRC Press. p. 337-366.

Raij, B. Van. 1991. Fertilidade do solo e adubacao. Sao Paulo, Piracicaba, Brasil. POTAFOS. 343 p.

Sánchez, P; Salinas, J.G. 1981. Low-input technology for managing oxisols and ultisols in Tropical America. Advances in Agronomy 34: 279-406.

Shoemaker, H.E.; Mclean, E.O.; Pratt, P.F. 1961. Buffer methods for determining lime requeriments of soils with appreciable amounts of exchangeable aluminun. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 25: 247-277.

Tisdale, S.; Nelson, W.; Beaton, J.; Havlin, J. 1993. Soil Fertility and Fertilizers. 5 ed. Columbus, USA, Mac Millan Publishing.

Vitti, G.C. et al. 1996. Tecnicas de utilizacao de calcario e gesso na cultura dos citros. in: anais iv seminario internacional de citros: nutricao e adubacao, Sao Paulo, Brasil. Fundacao Cargill. p. 131-160.

Yost, R. et al. 1991. Uso de sistemas de apoyo-decisión para hacer recomendaciones de cal y fósforo. In: Manejo de Suelos Tropicales en Latinoamérica, ed. por T.J. Smith et al. San José, Costa Rica, North Carolina State University. p. 177-185.

LA IMPORTANCIA DE LA RAÍZ EN LA NUTRICIÓN MINERAL DE LAS PLANTAS

Marco V. Gutiérrez

Este capítulo cubre los aspectos básicos y más novedosos del desarrollo, la estructura, y el funcionamiento de las raíces de las plantas superiores, con énfasis en los sistemas radicales de las plantas tropicales. Estos incluyen aspectos genéticos, fisiológicos y ambientales del funcionamiento de las raíces. Se discutirán los avances más recientes en la investigación sobre la dinámica del desarrollo y la fenología de los sistemas radicales de las plantas, tanto de las raíces gruesas como de los sistemas más dinámicos de las raíces finas, su relación con la formación de la rizosfera y la capacidad de modificación del ambiente edáfico, la coordinación entre el funcionamiento de la raíz y el tallo, y la detección temprana de la colonización de la rizosfera por organismos simbióticos y patogénicos.

Los sistemas radicales de las plantas están diseñados para satisfacer diferentes requerimientos de las plantas en términos de su anclaje en el sustrato, la adquisición y el transporte de los recursos del suelo (agua y minerales esenciales), y el almacenamiento de los mismos. La nutrición mineral de las plantas está en buena medida bajo control genético porque la arquitectura de la raíz determina el volumen de suelo disponible para la extracción de agua y minerales, y porque el funcionamiento de los transportadores en las membranas de las células radicales representa un proceso fisiológico altamente regulado por la actividad de los genes e influenciado por múltiples factores ambientales.

Virtualmente todos los estudios conducidos con plantas deberían incluir una evaluación de las raíces. Parámetros arquitecturales y funcionales de importancia al estudiar los sistemas radicales de las plantas en un contexto agrícola incluyen su profundidad y distribución, y su comportamiento fenológico en relación con la fenología de la parte aérea. Las propiedades arquitecturales de las plantas determinan en buena medida las interacciones de competencia, complementariedad, o compensación observadas entre las plantas tanto en sistemas naturales como cultivados. El desarrollo de asociaciones edáficas en los ecosistemas tropicales es la máxima expresión de la especialización de los sistemas radicales a sus sustratos, en algunos casos mediada probablemente por el establecimiento exitoso de relaciones simbióticas.

La biomasa y la distribución de los sistemas radicales de las plantas cambia de manera predecible en los diferentes biomas del mundo, y están involucradas en el control de los ciclos biogeoquímicos e hidrológicos de los ecosistemas terrestres. También guardan relación con el comportamiento fenológico de diferentes especies, conceptos de mucha aplicabilidad en contextos agrícolas. Las raíces gruesas intervienen en el bombeo de agua y nutrientes de las capas profundas a las superficiales del suelo, contrarrestan por lo tanto los efectos de la lixiviación de minerales, y mejoran la fertilidad de suelo y la eficiencia en el uso de los recursos.

Esta actividad de bombeo de agua desde capas más profundas del suelo descansa en la operación de un mecanismo fisiológico de ascenso hidráulico (*hydraulic lift*), en el que gradientes locales de potencial hídrico entre diferentes horizontes del suelo y la raíz permiten

la movilización de agua a lo largo del perfil del suelo, pero a través de las raíces de las plantas. En un contexto ecológico, el fenómeno del ascenso hidráulico ha sido citado como la causa de la formación de algunas asociaciones vegetales.

La sorprendente plasticidad fenotípica de los sistemas radicales de las plantas se expresa por ejemplo en la gran adaptabilidad de la relación raíz:tallo, que tiene profundas implicaciones en la tolerancia de las plantas al estrés hídrico, y cuya selección a través de las técnicas del fito-mejoramiento resultó en la producción de variedades de cultivos anuales modificadas en su patrón de partición de asimilados. Estos cultivares se caracterizan por la menor asignación de biomasa a los sistemas radicales, poco competitivos pero diseñados para desempeñarse en un ambiente caracterizado por la ausencia de competencia y por la alta disponibilidad de los recursos en los alrededores de la reducida rizosfera.

Esta plasticidad fenotípica y el conocimiento de los múltiples efectos fisiológicos de las raíces sobre el tallo han dado como resultado el desarrollo de prácticas agrícolas que modifican los parámetros arquitectónicos y fisiológicos de las raíces. Estas prácticas incluyen la fertilización de los cultivos, la poda de las raíces en sistemas de rompevientos, el forzamiento de la cosecha de los árboles frutales, la poda por aire de las raíces de plántulas en vivero, el uso de reguladores de crecimiento en el control del desarrollo de las raíces, y las inoculaciones con simbiontes.

Los sistemas radicales incluyen tanto raíces gruesas como raíces finas, que difieren en su distribución en el perfil del suelo, su desarrollo, longevidad, estructura, y funcionamiento. La población de raíces finas se localiza predominantemente en la superficie del suelo, es altamente variable y más efímera que las raíces gruesas, y responde activamente a los cambios ambientales. Se acepta que las raíces finas están directamente involucradas y son esenciales en la absorción de agua y nutrientes minerales de la solución del suelo. Algunos estudios de las tasas de uso de agua de las plantas en el campo indican sin embargo que las raíces gruesas también son activas en la absorción del agua, particularmente del agua profunda. Las raíces gruesas son importantes además en el almacenamiento de agua, carbohidratos, minerales, mucílagos y otras sustancias, que juegan un importante papel en el control de la fenología de las especies, y en la recuperación posterior a varios tipos de estrés como la poda, los incendios, la herbivoría y las enfermedades.

La producción de metabolitos secundarios en las raíces es también de importancia. Estos han sido involucrados en diversos tipos de interacciones entre las plantas, conocidas como alelopatía y territorialismo. Aunque las respuestas de las raíces de las plantas tropicales a la herbivoría y las enfermedades han sido muy poco estudiada, los mecanismos de defensa de las raíces y el desarrollo de prácticas agrícolas de protección de plantas, dirigidas a las raíces, deben ser estudiados y desarrolladas, respectivamente.

Otro ejemplo de situaciones en las que las raíces de las plantas intervienen en la recuperación luego de diversos tipos de estrés es el proceso de presión de raíz, que se expresa en las hojas en la forma de gutación. La generación de la presión de raíz es una consecuencia directa de la absorción de minerales bajo condiciones que no favorecen la transpiración. El desarrollo de presiones en el xilema de muchas especies de plantas tropicales ha sido implicado en la recuperación de los vasos cavitados luego de la ocurrencia

de estrés hídrico. Además, el equilibrio alcanzado entre el potencial hídrico del suelo y de la planta, particularmente el de la raíz, lo cual ocurre en la madrugada, permite la utilización de las plantas como tensiómetros naturales. Sin embargo, la presión de raíz y la gutación son responsables también de algunos síndromes fisiológicos caracterizados por el estallido de los tejidos, que puede resultar, por ejemplo, en frutos agrietados.

El descubrimiento reciente de las funciones de los hidrogeles del xilema (como las pectinas de las láminas medias) y su modificación por algunos minerales esenciales que se transportan en la corriente de transpiración, ilustra la importancia de los minerales como mensajeros químicos en las plantas, y su implicación en la coordinación de fenómenos fisiológicos aparentemente independientes como la conductividad hidráulica del xilema y la tasa de absorción de minerales en las raíces.

Las respuestas de las raíces a los cambios en el ambiente del suelo son poco conocidas, pero la información disponible muestra una alta diversidad y plasticidad en la morfología de las raíces en respuesta al cambiante ambiente del suelo. Esta plasticidad probablemente refleja en alguna medida la adaptación a la variabilidad espacial y temporal que caracteriza el ambiente edáfico. Las raíces deben responder rápidamente a cambios en múltiples factores ambientales que afectan su propio metabolismo, así como la disponibilidad de recursos importantes (agua y minerales). Estos factores ambientales incluyen la temperatura, la aireación, la compactación, y las propiedades químicas de la solución del suelo.

La plasticidad fenotípica también se observa en las características estructurales de las raíces, en aspectos tales como el número, la posición, y el grado de suberización de las capas de endodermis, y las características anatómicas del xilema que determinan la vulnerabilidad de las raíces a la cavitación y en general la propensión de las mismas a la desecación. Las raíces son de importancia en la determinación de la estructura y el contenido de materia orgánica del suelo, y de los cambios en su porosidad. Además, las raíces de las plantas son capaces de modificar el funcionamiento de la parte aérea (específicamente de las hojas) acorde a los eventos subterráneos que afectan a las raíces, a través de la producción y la transmisión de señales hidráulicas, químicas, y hormonales (ABA, citoquininas, minerales implicados en los movimientos estomáticos).

La actividad de los sistemas radicales de las plantas en la extracción de minerales tóxicos del suelo, y su papel estimulador del crecimiento de los microorganismos del suelo, determinan el éxito de las plantas como agentes de la fito-remediación y la recuperación de suelos contaminados por diversos productos, incluido el petróleo. Una de las características más sobresalientes de los sistemas radicales de las plantas es su asociación simbiótica casi universal con hongos habitantes del suelo, que culmina con el desarrollo de las micorrizas. En su sentido más amplio, las plantas son al menos organismos dobles. Esta y otros tipos de asociaciones simbióticas como los nódulos de *Rhizobium* en las raíces de las leguminosas, frecuentemente mejoran la nutrición mineral de las plantas hospederas al facilitar la absorción de agua y P en el caso de las micorrizas y la fijación de nitrógeno atmosférico en el caso de *Rhizobium*. El desarrollo de micorrizas es crítico para el establecimiento de muchas especies herbáceas y perennes, tanto en ambientes naturales como en situaciones agrícolas.

El desarrollo de la rizosfera ha sido recientemente relacionado con el patrón de diferenciación de los tejidos vasculares en la zona de crecimiento de la raíz. La formación de la rizosfera está relacionada con la aparición de rizovainas en las raíces de las monocotiledóneas. Estas rizovainas son el resultado de la actividad secretora de mucílagos a lo largo de la zona de diferenciación vascular de las raíces, que inicia el anclaje en el suelo, modifica el ambiente edáfico inmediato a través de la secreción de sustancias químicas capaces de solubilizar y quelatar algunos minerales, estimula el crecimiento de microorganismos simbióticos, y la producción de "células de borde" (*border cells*) que actúan como receptoras y traductoras de diversos estímulos y tipos de estrés físicos, químicos, y biológicos originados en la rizosfera.

Es de crucial importancia conocer la estructura y la fenología de los sistemas radicales de las plantas y relacionarlas con la fenología de la copa, con eventos climáticos y prácticas agrícolas. El comportamiento de los sistemas radicales de las plantas puede diferir sustancialmente del comportamiento de la copa, y la respuesta de las raíces finas a prácticas agrícolas como la irrigación y la fertilización puede variar marcadamente de la respuesta de la copa. Asimismo, eventos fisiológicos como el desarrollo del estrés hídrico y la producción de hormonas en las raíces del café, parecen ser los responsables de la ruptura de la latencia de las yemas florales de esta especie, desencadenada por lluvias. El conocimiento de la cronología de la producción y la longevidad de las raíces finas es esencial para maximizar las aplicaciones y el uso del agua, los fertilizantes y otros insumos agrícolas como los plaguicidas, de potencial importancia como contaminantes de las plantas, los suelos, la atmósfera, y el agua.

En resumen, todas las funciones de los sistemas radicales de las plantas guardan alguna relación, directa o indirecta, con la nutrición mineral. Estas funciones incluyen:

a) anclaje en el sustrato y soporte estructural, que afecta el acceso a los recursos del suelo y la tolerancia al volcamiento
b) absorción de agua, minerales, y otras sustancias orgánicas del suelo,
c) actividades biosintéticas (hormonas, vitaminas, enzimas),
d) almacenamiento de agua, minerales, y materiales orgánicos (almidón, mucílagos),
e) desarrollo de la rizosfera, establecimiento de relaciones simbióticas y de interacciones con otras plantas (alelopatía),
f) detección y defensa contra patógenos y herbívoros, y
g) reproducción asexual (algunas raíces tienen yemas)

Algunas raíces altamente especializadas son de enorme importancia en la agricultura, tales como las raíces carnosas y engrosadas utilizadas como alimento, y el velamen de las orquídeas. Algunas de las técnicas modernas disponibles para el estudio de los sistemas radicales de las plantas *in situ*, incluyen:

a) excavaciones
b) muestreos destructivos (*increment coring, in-growth cores*)
c) determinación de la abundancia natural de los isótopos estables del agua,
d) minirizotrones
e) radares (*ground-penetrating radar*)
f) resonancia magnética nuclear
g) técnicas moleculares

ABONOS ORGÁNICOS: PRODUCCIÓN Y USO DE COMPOST

Gabriela Soto

1. INTRODUCCION

Por muchos años los desechos de la agroindustria y los desechos orgánicos urbanos han sido depositados en ríos, basureros o enterrados. No es sino hasta hace poco que empezamos a determinar el impacto contaminante de estos materiales, y comprender la capacidad finita de dilución que tienen nuestros ríos y el planeta en general. Esto ha conllevado a una búsqueda de nuevas opciones de manejo de estos residuos.

Una de las opciones de manejo que más se están utilizando en el ámbito nacional e internacional es el compostaje, ya que se ha reconocido el valor nutricional y el potencial como mejorador de suelos de estos materiales.

En los últimos años, se ha dado una revalorización de la biología de suelos, como un componente importante en los sistemas de producción y se han empezado a utilizar prácticas de manejo al nivel de finca que permitan restablecer la vida del suelo. La adición de materia orgánica de una u otra forma, ya sea como coberturas vivas o coberturas secas, la adición de ácidos húmicos, la adición de materiales orgánicos frescos como la pulpa de café, la cachaza o gallinaza, y la adición de compost, son unas de las formas en las que se pretende restablecer la vida del suelo.

Estos materiales presentan las ventajas de favorecer la diversificación de la vida microbiana, a través de una mayor aireación y la diversificación de sustratos, dándole una mayor estabilidad al sistema suelo. La razón por la que se desee compostear va a ser determinante en el sistema de compost que se quiera utilizar. En Estados Unidos, la producción de compost se ha enfocado en el manejo de desechos y no en la producción de abonos para el mejoramiento de suelos. No es sino hasta fechas recientes (Toffey, 1998) que los productores de compost han reconocido el negocio potencial en la producción de compost para agricultura, especialmente horticultura y jardines. Por ejemplo en el estado de Filadelfia en Estados Unidos, de las 230,000 toneladas de biosólidos que se producen en plantas de tratamiento de aguas, una tercera parte es composteada a través de un sistema de pila de volteo, compost, que es vendido a los productores agrícolas (Toffey, 1998).

En Costa Rica, el uso de abonos orgánicos se inició especialmente entre los productores orgánicos del país, consecuentes con el principio fundamental que establece el mejoramiento de suelos como la base para el desarrollo de este sistema de producción (IFOAM, 1998). En la implementación y uso de los abonos en nuestro país, tuvo gran impacto la tecnología japonesa de producción de "bocashi" fomentada por el Ing. Shogo Sazaki del Servicio de Voluntarios Japoneses para la Cooperación con el Extranjero (JOCV). Esta tecnología ha sido ampliamente distribuída en el país por el Instituto Nacional de Aprendizaje (INA).

Otro factor que ha favorecido el desarrollo de la producción de abonos orgánicos del país ha sido la regulación en el manejo de los desechos del beneficiado del café que llevó a los beneficiadores a buscar opciones de manejo para la broza del café.

No ha sido sino hasta que los abonos orgánicos han sido popularizados por los productores orgánicos, que algunos productores convencionales han mostrado interés al reconocer sus ventajas al nivel de suelo y como una opción para el manejo de desechos. Esta popularización en el uso de abonos orgánicos que nace entre productores, ha generado una serie de confusiones en la terminología utilizada para denominar las diferentes formas de abonos orgánicos. En el presente documento se presentan definiciones de los diferentes abonos orgánicos y se comparan en sus características básicas, se discute el proceso bioquímico de compostaje y vermicompostaje, se describen los contenidos nutricionales de las principales materias primas del país y se discuten las técnicas para medir la calidad del producto final del compostaje.

2. DEFINICIONES

1. ABONOS ORGÁNICOS: se entiende por abono orgánico todo material de origen orgánico utilizado para fertilización de cultivos o como mejorador de suelos. Se incluyen dentro de los abonos orgánicos materiales como la gallinaza, la broza del café, coberturas como el kudzú o Arachis, compost y ácidos húmicos.

2. ABONOS PARA LA AGRICULTURA ORGÁNICA: son aquellos abonos que se pueden utilizar en la agricultura orgánica. Su utilización está regulada por las normas internacionales de certificación. No todos los abonos orgánicos puede ser utilizados en agricultura orgánica, por ejemplo, el uso de excretas de animales totalmente estabulados está prohibido por la regulación europea (Ley 2092/91). Los ácidos húmicos permitidos son solo aquellos cuyo extractante haya sido KOH o NaOH (OMRI, 2001). Y por el contrario, enmiendas como el carbonato de calcio o fertilizantes como la roca fosfórica que aunque no son abonos orgánicos, son permitidos en agricultura orgánica (OMRI, 2001).

3. COMPOST: Proceso biológico controlado de transformación de la materia orgánica a humus a través de la descomposición aeróbica.

Se denomina **COMPOST** al producto resultante del proceso de compostaje.

Co-compostaje: proceso de compostaje de lodos urbanos junto con otros residuos orgánicos sólidos.

4. BOCASHI: Receta japonesa de producción de abono orgánico, de volteos frecuentes y temperaturas por debajo de los 45-50°C, hasta que la actividad microbiana disminuye al disminuir la humedad del material (Cuadro 1). Se considera un proceso de compostaje incompleto. Algunos autores lo han considerado un abono orgánico "fermentado" (Restrepo, 1996), sin embargo es un proceso enteramente aeróbico.

El bocashi fue introducido en el país por técnicos japoneses y la mayoría de los productores practican la receta original: 1 saco de gallinaza, 1 sacos de granza, 2 sacos de

tierra, 1 saco de semolina de arroz o salvado, 1 saco de carbón molido y 1 litro de melaza (Sasaki, et al, 1994), Sin embargo, dada las limitaciones para adquirir algunos de estos materiales, los agricultores han ido sustituyéndo con ingredientes locales (Rodríguez y Paniagua, 1994). Por lo tanto, actualmente se llama "bocashi" al sistema de producción y no a la receta original.

Cuadro 1. Comparación entre el proceso de compostaje y "bocashi"

Características	COMPOST	BOCASHI
Producto final	Sustancias húmicas	Materia orgánica en descomposición
Temperaturas máximas	65-70ºC	45 a 50 ºC
Humedad	60% durante todo el proceso	Inicial 60%, desciende rápidamente
Frecuencia de volteo	Regida por temperatura y CO_2	Una o dos veces al día (temperatura)
Duración del proceso	De 1 a 2 meses	De 1 a 2 semanas

5. VERMICOMPOST: Proceso biológico de transformación de la materia orgánica a humus, a través de una descomposición aeróbica realizada principalmente por lombrices.

Se conoce como Lombricultura la biotecnología orientada a la utilización de la lombriz como una herramienta de trabajo para el reciclaje de todo tipo de materia orgánica (Bollo, 1999).

3. EL PROCESO DE COMPOSTAJE

El proceso de compostaje es una descomposición predominantemente aeróbica, en la que los substratos más lábiles son descompuestos más rápidamente por bacterias, hongos y actinomicetes mesófilos. Posteriormente se da la descomposición de materiales más recalcitrantes como la lignina, por organismos termófilos, para pasar luego a la formación de sustancias húmicas en la fase de enfriamiento y maduración (Fig. 1). La condensación de los fenoles junto con el amonio en el proceso de humificación es tal vez la fase más importante en el proceso de compostaje. Medidas de la tasa de humificación muestran que no se da un aumento en el contenido de ácido húmicos y fúlvicos durante los primeros 15 días. Posteriormente, hay un fuerte incremento en el contenido de ácidos húmicos, lo que cambia la relación de ácidos húmicos a fúlvicos de 0.3:1 a 10:1 (Paul y Clark, 1996).

Los organismos presentes durante el proceso de compostaje varían un poco dependiendo de los sustratos y las condiciones del proceso. Son sus interacciones y la secuencia en el tiempo los que determinan el tipo de compostaje. Bacterias y hongos se encargan de la fase mesófila, especialmente bacterias del género Bacillus sp. , aunque existen también algunos Bacillus termófilos. El 10% de la descomposición es realizado por bacterias, del 15-30% es realizado por actinomicetes. Después de que los materiales lábiles han desaparecido, los predominantes son los actinomicetes y las levaduras. Algunos

actinomicetes están presentes inclusive en la fase de formación de sustancias húmicas. Los hongos son los responsables por el 30 al 40% de la pérdida de peso en las compostera. Su mayor actividad es en la fase de humificación (Paul y Clark, 1996).

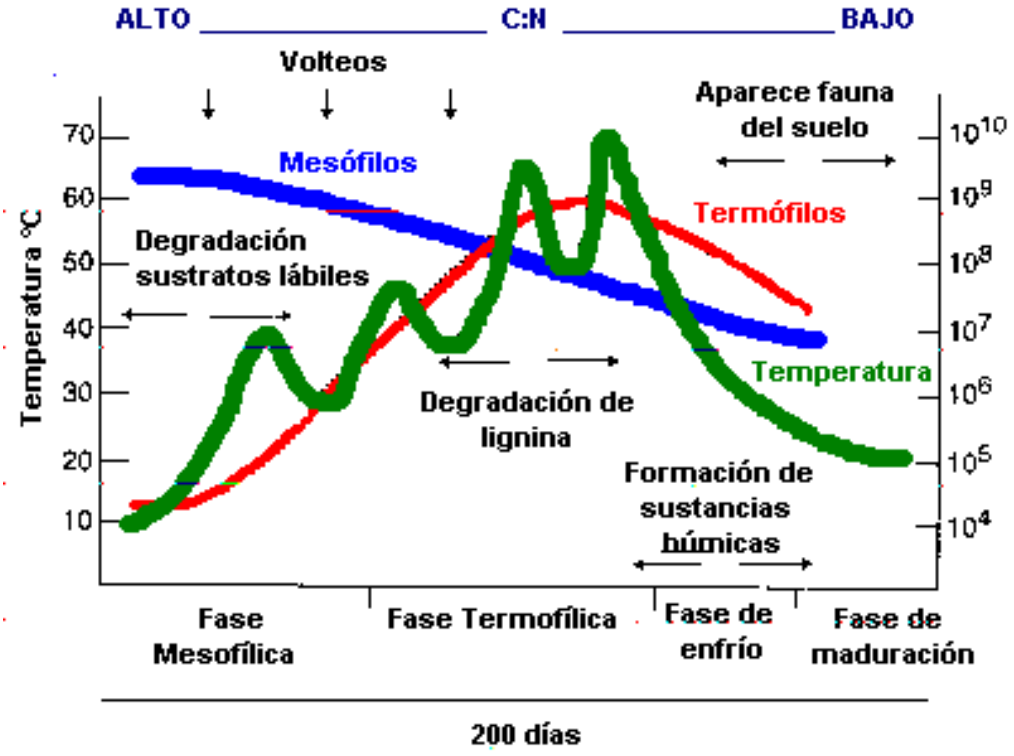


Fig. 1. El proceso de compostaje (tomado de Paul y Clark, 1996)

Cuadro 2. Microorganismos que participan en el proceso de compostaje.

	Bacterias	Hongos	Actinomicetes
Fase mesofílica	*Bacillus brevis, B. circulans, B. subtilis, B. licheniformis*		
Fase termofílica	*Bacillus stearothermophilus*	*Thermophyllum,*	*Nocardia, sp. Streptomyces sp., Thermoactynomicetes*
Fase de maduración		*Absidia, Mucor, Allescheria spp. Trichoderma, Penicillum, Aspergillus,* etc.	

4. CONDICIONES IDEALES DE COMPOSTEO

Dado que el compostaje es un proceso de descomposición predominantemente aeróbico, las prácticas de manejo deben crear condiciones óptimas para el establecimiento y desarrollo de estos organismos.

Las condiciones que favorecen el crecimiento de los microorganismos aeróbicos son: presencia de oxígeno, temperatura, agua y una nutrición balanceada. Hay otros factores también pueden afectar su desarrollo tales como: pH, fuentes energéticas de fácil solubilización como azúcares simples, y superficie de contacto o tamaño de partícula.

Cuadro 3. Condiciones ideales para el compostaje

Condición	Rango aceptable	Condición óptima
Relación C:N	20:1 – 40:1	25:1 – 30:1
Humedad	40 – 65%	50 –60 %
Oxígeno	+ 5%	≈ 8%
pH	5,5 – 9.0	6,5 –8,0
Temperatura °C	55 – 75	65 – 70°C
Tamaño de partícula	0,5 – 1,0	Variable

(tomado de Rynk, 1992).

1. Relación C:N y las materias primas disponibles a nivel nacional

Una buena relación C:N es importante para suplir un buen sustrato para el desarrollo de los microorganismos, lo que a final acelera el proceso de descomposición, y mejora la calidad del producto final. Conociendo la estructura molecular de los organismos que hacen el compost, se evidencia que tipo de sustrato es preferido por los diferentes organismos. Por ejemplo, las bacterias presentan un contenido proteínico mucho mayor que los hongos, llegando a ser hasta el 55% de su peso, mientras que los hongos como *Aspegillus*, tienen en su pared celular un 53% de glucosa y 19 % de quitina. Las bacterias requerirán de sustratos con contenidos de nitrógeno más altos que los hongos. Mientras que estos últimos se encargan de la descomposición de sustratos más recalcitrantes como la celulosa y la lignina.

Relaciones C:N muy altas, ocasionan que el proceso de descomposición sea más lento. Relaciones C:N muy bajas, hacen que se pierda N por falta de estructuras de carbono que permiten retener el N. En el caso de la gallinaza, especialmente, se ha visto que en la primera semana se puede perder por volatilización hasta el 85% del amonio, si el manejo y la mezcla no son las adecuadas (Hansen, et al. 1993).

FUENTES DE NITROGENO

En Costa Rica las fuentes más accesibles de N son las excretas animales en general, la broza del café y los residuos de pescado el tankaje de la matanza de animales (Cuadro 5).

En países como Canadá y Francia se está regulando el uso de cualquier excreta animal sin compostear por el impacto que estas prácticas puedan tener sobre la contaminación de nitratos de agua subterráneas.

En nuestro país, la gallinaza es tal vez la fuente más fácilmente disponible de N, en volúmenes adecuados para composteras a gran escala. Existe, sin embargo mucha variabilidad en su contenido de N dependiendo del tipo de manejo en gallinero. Pollos de engorde y reproductoras pesadas son por lo general criadas en piso, con camas de granza o aserrín que normalmente disminuyen el contenido de nitrógeno total de la mezcla comercializada. Las reproductoras livianas y las ponedoras son criadas en jaula, por lo que no requieren de cama (Murillo, 1999). Existe también variación por el ciclo de crecimiento y la infraestructura del gallinero. Es por esto que se recomienda hacer un análisis periódico del material a utilizar, para modificar las proporciones en las mezclas en caso necesario.

Otras fuentes de nitrógeno como son la harina de sangre o de pescado, son de un alto costo económico, y disponibles solo en pequeños volúmenes. Fertilizantes nitrogenados son una opción que ha sido evaluada cuando el compost no se utiliza para fincas orgánicas. Normalmente las aplicaciones se hacen en solución, en forma escalonada. Ensayos comparativos de fuentes de nitrógeno orgánicas con fertilizantes han demostrado que en general se alcanzan temperaturas más altas y el producto final es de mejor calidad cuando se utilizan fuentes naturales de nitrógeno (Reis, et al, 1999).

Otras posibles fuentes de N son las leguminosas, que son utilizadas sobretodo por pequeños productores con muy buenos resultados. A gran escala se dificulta su disponibilidad en los volúmenes requeridos. En ensayos hechos en Guanaranja, con diferentes fuentes de nitrógeno (gallinaza, boñiga, Mucuna sp. y Arachis sp.), en una relación C:N similar, se encontró que el compost de mejor calidad, en cuanto a balance de nutrimentos, fue la mezcla Arachis-boñiga (datos no publicados).

Cuadro 5. Contenido de nutrimentos de algunos de desechos de la agroindustria en Costa Rica

Material	N	P	Ca	Mg	K	Fe	Cu	Zn	Mn
	%					mg kg^{-1}			
Broza del café	2,0-3,2	0,3	4,3	1,8	0,4	590	30	22	94
Cachaza	1,3	0,7	2,0	0,2	0,4	15700	73	116	519
Pulpa de naranja	0,84– 1,0	0,11	0,5	0,09	1,0	45	9	16	11
Pulpa de piña	0,81	0,12	0,4	0,15	1,22	366	10	14,7	86
Banano de rechazo	0,8	0,58	0,45	0,4	6,45	194	5,8	13	63
Pinzote de banano	0,9-1,5	0,13	0,4	0,2	8,2	85	17	14	75
Vinazas	0,4	0,1	1,1	0,6	4,9	1567	44	127	81
Gallinaza	1,0-3,0	1,4	2,6	0,75	2,5	325	44	315	330
Estiércol vacuno*	1,6	1,2	2,2	1,1	1,8	-	-	-	-
Porquinaza*	1,8	2,6	2,0	0,2	2,1	-	-	-	
Harina de pescado	9,5	7,0	8,5	0,5	-	-	-	-	-
Sangre seca*	13,0	2,0	0,5	-	1,0	-	-	-	-

* tomados de Bertsch, 1995.

Otras materias primas

La BROZA es un material óptimo para el composteo, ya que además de presentar un alto contenido de nitrógeno, es alta en azúcares, agua, fuentes de carbono y un tamaño de partícula adecuado. El único inconveniente que presenta son los bajos contenidos de fósforo, que deben ser suplidos con algunas otras fuentes. La CACHAZA y los subproductos del procesado del azúcar, son los materiales que presentan los más altos contenidos de fósforo, por lo que la mezcla cachaza-broza da un material final de muy buena calidad.

La CACHAZA también es ideal para el composteo, presenta el adecuado tamaño de partícula, pH, contenido de azúcares y fósforo. Una fuente externa de nitrógeno puede ser adicionado, pero no es indispensable.

Otras fuentes como el BANANO, alto en K, pero bajo en N y P. Sin embargo su alto contenido de almidones lo hace un producto de fácil descomposición. En el composteo de banano ha trabajo especialmente CORBANA, la EARTH y las compañías bananeras en general.

La pulpa de NARANJA y de PIÑA, presentan limitaciones desde el punto de vista del pH, ya que ambas tienen un pH inicial entre 3 y 3,5.

2. Oxígeno

Otro factor determinante para obtener un producto de buena calidad al corto plazo es la presencia de oxígeno durante el proceso de compostaje, especialmente en las fases iniciales del proceso. Para favorecer una buena oxigenación se debe manejar un volteo frecuente, tamaño de partícula adecuado, mezclar en la receta materiales que permitan una buena oxigenación, y manejo adecuado del agua.

La frecuencia de volteo debe estar determinada por la presencia de oxígeno. Para esto se han diseñado equipos para medir la presencia de oxígeno directamente, al interior de la pila de compost, o en su defecto la presencia de CO_2. Se recomienda voltear cuando la concentración de CO_2 esté por encima del 8%.

Si no se cuenta con el equipo adecuado, la frecuencia de volteo puede estar determinada por temperatura, que es un indicador directo de la actividad microbiana.

Existen sistemas pasivos de compost, a través de aireación por tubería o a través de ventiladores colocados en la parte inferior de las camas de compost. Estos sistemas funcionan efectivamente, pero son más costosos y el proceso toma un poco más lento.

Es claro que aunque el compostaje es un proceso predominantemente aeróbico, en todo compost, se darán puntos de anaerobiosis. Los organismos anaérobicos son menos eficientes en su metabolismo, por lo que el compostaje anaeróbico es más lento que el proceso aeróbico. Una gran desventaja que presenta el proceso anaeróbico es la presencia de

malos olores, ya que los olores son generados en su gran parte por condiciones de reducción.

3. Agua

El tercer factor importante para el éxito del compostaje es la humedad. Se debe adicionar suficiente agua como para favorecer la solubilización de los materiales y la actividad microbiana. Sin embargo, no se debe agregar tanta agua que se favorezcan condiciones anaeróbicas o lavado de nutrimentos.

En el Cuadro 6 se observa el efecto de composteo de broza a cielo abierto, comparado con broza composteada bajo techo con o sin lombrices. El composteo a cielo abierto en época lluviosa ocasiona pérdidas de nutrimentos, especialmente nitrógeno y potasio.

En el proceso del bocashi, la temperatura desciende al producirse el secado del material. En presencia de agua, al ser de nuevo utilizado en el campo, el bocashi se calentará de nuevo, al tener los microorganismos de nuevo condiciones óptimas para su desarrollo.

Cuadro 6. Variaciones en el contenido de nutrimentos de compost de broza preparado bajo diferentes condiciones de manejo

Broza de café	Humedad	pH	N	P	Ca	Mg	K
	%		%				
Compost en verano (broza fresca)	50,0	9,6	2,06	0,24	0,77	0,18	2,76
Vermicompost broza vieja	51,0	-	1,10	0,13	0,62	0,19	0,29
Vermicompost al aire libre	48,0	5,5	1,50	0,12	0,71	0,17	0,17
Vermicompost bajo techo	65,0	7,5	2,32	0,21	2,41	0,80	0,79

Datos facilitados por productores nacionales.

5. USO DE INOCULANTES PARA COMPOST

Iniciar el proceso de compostaje con una población especializada en descomposición, y no esperar a que esta se desarrolle a través del sistema de compostaje, acelera el proceso de descomposición y permite aumentar los contenidos finales de nitrógeno. Entre los productos que se encuentran disponibles en el mercado se incluyen, microorganismos y enzimas. La vasta mayoría de los experimentos en este campo han demostrado que la inoculación no afecta significativamente el proceso de compostaje (Paul y Clark, 1996). En ensayos realizados con pulpa y raquis de banano en Bandeco (Carlos Abarca, tesis no publicada), se encontró que no había diferencia significativa entre la inoculación con inoculantes comerciales disponibles en el mercado y el tratamiento que no

usó inoculante. Ensayos realizados con pulpa de naranja en Guanaranja, no presentaron diferencias en la tasa de descomposición entre los inoculantes comerciales y el tratamiento en el que se utilizó la reinoculación con compost maduro.

Sin embargo se debe mencionar, que el uso de inoculantes debe ser evaluado cuando ya se ha logrado un sistema de producción de compost estable. Solo entonces se logrará ver el efecto de inoculaciones de este tipo (Hoiting, comunicación personal).

6. INFRAESTRUCTURA Y EQUIPO DE COMPOSTEO.

Los costos más altos de producción de compost hasta este momento son el transporte de la materia prima y el volteo, en composteo a cielo abierto. En condiciones de alta precipitación, la infraestructura para evitar las pérdidas por lixiviación de nutrimentos, será uno de los costos más altos del proceso. En condiciones de altas precipitaciones también es necesario el manejo de las aguas de lavado. En la mayoría de las composteras, lo que se está usando son lagunas de precipitación de los materiales.

En cuanto a equipo de volteo en el país se han importando diferentes diseños de maquinaria de volteo, en su mayoría movidos por tractor, de por lo menos 80 a 100 hp. Algunas copias también se han hecho, lo que ha reducido el costo del equipo. Diseños eléctricos también se están utilizando en Jugar del Valle, en Zarcero, por ejemplo.

Para la selección del sitio de composteo es importante tener en cuenta posibles fuentes de agua para el proceso de compostaje, pero también la distancia a fuentes de agua, para evitar riesgos de contaminación. Distancia a la comunidad más cercana. Las composteras que trabajen con gallinaza, deberán cumplir la legislación vigente en gallinaza que dice que requiere de distancias mínimas de 1 km. a la primera habitación y 4 Km. a la comunidad o caserío.

Los terrenos para la producción de compost con volteadora deben ser preparados cuidadosamente. Si se recogen las aguas de escorrentía es útil que el terreno tenga un desnivel que facilite el proceso. Pero el terreno debe ser nivelado para evitar acumulo de agua o problemas con la máquina de volteo. Igualmente, todo residuo de actividades previas, o piedras deben ser eliminadas para que no se dañe el equipo.

7. PROBLEMAS POTENCIALES EN LA COMPOSTERA

A. MOSCAS

Uno de los problemas más comunes encontrados por mal manejo de la compostera, es el problema de moscas. Los problemas pueden ser evitados a través del volteo frecuente de pilas de por lo menos 1 metro de alto. La utilización de trampas, control biológico, son algunas de las opciones de manejo. Pero lo más importante es evitar el problema, antes de que se presente.

En el caso de compost que no se utiliza para agricultura orgánica, es posible utilizar larvicidas inclusive a nivel de materia prima, que tendrán efecto a nivel del período inicial del composteo, que es donde más se presentan mayormente los problemas.

B. OLORES

La producción de olores es proporcional a la presión de vapor. La presión de vapor del medio aumenta hasta 10^3 veces al pasar la temperatura de 20°C a 60 °C. Por lo tanto, la única forma de evitar totalmente la producción de olores en el compostaje, sería evitando que la temperatura subiera. Sin embargo, la mayoría de los problemas por olores se deben a condiciones de reducción durante el proceso de descomposición. Si se maneja el sistema oxigenado es posible disminuir el mayor impacto en la producción de olores.

Existen tres procesos básicos que conllevan a la producción de olores: la producción de ácidos grasos volátiles durante la descomposición de azúcares simples, y la producción de amoniaco y sulfitos durante la descomposición de proteínas en condiciones anaeróbicas (Miller, 1993). Sin embargo, es posible manejar la mayoría de estos olores a través de un buen proceso de oxigenación con factores como el tamaño de partícula, la distribución de la partículas, volteos frecuentes, manejo del agua, etc.

Existen sin embargo olores en algunas de las materias primas antes de iniciar el proceso de compostaje, tales como la mayoría de las excretas, los desechos de pescado, etc. En tal caso, una forma de disminuir los olores puede ser cubriendo el material con el compost viejo, o con otro material como aserrín, turba, o carbonato de calcio, etc. (Rynk, 1992).Sin embargo el abuso en el uso del carbonato de calcio puede llegar a afectar el proceso de compostaje en sí mismo por lo que debe restringirse. Los japoneses han recomendado el uso de dosis pequeñas de carbón molido para atrapar olores en la compostera.

Cuadro 7. Principales causas de la producción de olores en el proceso de compostaje

SUSTRATO	SUBPRODUCTOS	REACCIONES	MANEJO
Azúcares →	✓ Acetato ✓ Propioanto ✓ butarato	$C_6H_{12}O \rightarrow CH_3COO^-$ $\rightarrow C_2H_5COO^-$ $\rightarrow C_3H_7COO^-$	Aireación
Proteínas →	✓ Peptidos ✓ Amino ácidos ✓ NH_3 ✓ Protoplasma bacterial	**OXIDACION** $NH_4 + 2\ O_2 \rightarrow NO_3 + H_2O$ $NH_4 + 2\ O_2 \leftarrow NO_3 + H_2O$ **REDUCCION**	C:N < 20 libera NH_3 C:N 25-35 ideal C:N > 30 poco NH_3
Proteínas →	✓ sulfitos	**OXIDACION** $RSH + 2\ O_2 \rightarrow RSO_4^- + H^+$ $RSH + 2\ O_2 \leftarrow RSO_4^- + H^+$ **REDUCCION**	C:S < 200 → sulfitos C:S < 200 ideal

En plantas de compostaje en Estados Unidos se han hecho grandes inversiones en el control de olores a través de biofiltros, después de un proceso de aprendizaje que ha costado millones en cierre de plantas de tratamiento por quejas de las comunidades (Smalley, 1998). Es importante aprender de estas experiencias si se desea trabajar en sistemas de compostaje cerrados.

C. LIXIVIADOS Y ESCORRENTIA

En nuestras condiciones de alta precipitación en donde la mayoría de las composteras se encuentran a cielo abierto, el manejo del agua de escorrentía se convierte en un problema prioritario. Los productores de compost han establecido pequeños tanques de sedimentación para recoger lixiviados y reutilizarlos en la misma compostera o como fertilizante foliar. Análisis realizados a aguas de escorrentía en varias composteras han demostrado que son altas en la mayoría de nutrimentos, especialmente nitrógeno.

Los estudios de impacto ambiental requeridos actualmente para establecer composteras a mayor escala, solicitan estudios de infiltración, profundidad de la tabla de agua, etc. El aspecto que mayormente preocupa al hablarse de lixiviaciones es la contaminación de aguas subterráneas con nitratos. Por eso es muy importante si se trabaja con excretas animales, favorecer un rápido proceso de compostaje, que permita una asimilación rápida de estos materiales, en las dos primeras semanas. Esto se logra a través de un volteo frecuente, una estimulación a la población inicial de microorganismos a través de inoculación o fuentes de azúcares simples, y una mezcla adecuada con materiales altos en carbono, de partícula pequeña, como la broza o el aserrín.

8. CALIDAD DEL PRODUCTO FINAL

Cómo determinar la calidad del producto final es una de las áreas de mayor investigación en este momento. Actualmente los laboratorios de análisis de suelos y foliares han optado por ofrecer como análisis de compost la digestión total, que permita dar información sobre contenidos totales de nutrimentos. Sin embargo se sabe que este análisis sobre estima la disponibilidad de nutrimentos al corto plazo, ya que las tasas de liberación van a ser más lentas. Otras análisis que se realizan son análisis de germinación, control de enfermedades, contenido de metales pesados y actividad microbiana. Ramírez y colaboradores de la UCR han desarrollado una metodología que utiliza la actividad microbiana como indicador de calidad del compost (Vandevivere y Ramírez, 1994, Salas y Ramírez, 1999). Otro aspecto ampliamente estudiado en compost proveniente de residuos urbanos es el contenido de metales pesados (Cuadro 8).

Cuadro 8. Máximos niveles permitidos de contaminantes en el compost

Metal	Canadá [a] µg / g	Unión Europea compost orgánico[b] (µg / g)	Otros[c]	
Arsénico	10	-	Plástico (%)	1
Cadmio	3	0,7	Otros (%)	2
Cromo	50	70	PBC (µg / g)	0,5
Plomo	150	45	Captán (µg / g)	0,05-100
Mercurio	0,15	0,4	Clordano (µg / g)	0,3
Níquel	60	25	Lindano (µg / g)	1-7
Cobre	-	70	2,4-D (µg / g)	0,5-1,0
Zinc	500	200		

[a] Ontario, Canadá. (Gies, 1992). [b] Anexo II. Regulación Europea 2092/91. Enmienda 1997. [c] USDA (Henry, 1991).

Cuadro 9. Características generales de un compost comercialmente aceptable

Característica	Rango óptimo	Característica	Rango óptimo
% N	> 2	P%	0,15-1,5
C:N	< 20	Color	Café-negro
Cenizas (%)	10-20	Olor	Tierra
Humedad	10-20<40	CICE (meq/100g)	75-100

(tomado de Paul y Clark, 1996)

En realidad no existe a la fecha un análisis único que nos mida la calidad del compost (cuadro 9). Pero esto puede ser por las características mismas del compost, donde no-solo se busca un material que libere nutrimentos en cantidades adecuadas, que mejore la estructura del suelo, controle enfermedades, retener agua, aumentar la capacidad de intercambio catiónico, etc. Un simple análisis de la calidad del compost no nos daría todas estas respuestas. Es necesario que se utilicen una mezcla de análisis.

9. VERMICOMPOST O LOMBRICULTURA

Se conoce como vermicompost o lombricultura, el compostaje de desechos orgánicos utilizando la lombriz de tierra. De las 8000 especies de lombrices que existen en el planeta, la lombriz californiana, *Eisenia foetida*, fue seleccionada por Tomas Barret en 1930 en Estados Unidos, por su alta capacidad de reproducción, su capacidad de vivir en altas densidades, el amplio rango de desechos orgánicos de los que se alimenta y su adaptación a diferentes condiciones climáticas (Bollo, 1999) (cuadro 10)

Cuadro 10. Comparación de características de la lombriz californiana con un promedio de lombrices de otros géneros

	Longevidad (años)	Periodicidad de acoplamiento (días)	# de lombrices por cápsula
Eisenia foetida	16	7	2 a 21
Otras	4	45	1 a 4

(tomado de Ferruzi, 1994).

A. REQUERIMENTOS AMBIENTALES Y DE ALIMENTACION

Las condiciones óptimas para el desarrollo y establecimiento de las lombrices se describen el Cuadro 11. Uno de los factores determinantes es el contenido de humedad, dado que la lombriz requiere de un buen nivel para su alimentación y su respiración. *Eisenia* es capaz de soportar niveles de humedad por encima de 80%, pero el manejo del agua en la lombricera se ha utilizado también para combatir una de las mayores plagas de la lombriz: la lombriz Planaria, dado que este Platelmintho se prefiere condiciones alrededor del 85% de humedad.

La temperatura presenta un rango limitado, sin embargo en Costa Rica, productores de Coronado y Cuericí han logrado que se adapte a temperaturas de menos de 15°C, con períodos de adaptación de hasta 1 ó 2 meses (comunicación personal de productores). Un aspecto muy importante en lo que respecta temperatura es la temperatura que se produzca en la cama como resultado de la descomposición de los materiales. El uso de materias frescas en capas muy gruesas normalmente genera temperaturas muy altas que deben ser evitadas. La mejor forma de evitar el aumento en la temperatura es regulando la altura de la cama. Siles (1998) encontró que la mejor altura de cama para broza de café son 15 cm.

Cuadro 11. Condiciones para el establecimiento de la lombriz *Eisenia foetida*

	Rango	Optimo
Oxígeno (%)		> 8%
Temperatura °C	20 - 33	25 – 28
PH	5,5 – 9,0	6,8 – 7,2
Humedad (%)	65 – 80	70 – 75

ALIMENTACION

La alimentación de las lombrices es de materia orgánica en descomposición. Las lombrices requieren que el sustrato se encuentre en forma pastosa, que les permita succionar las porciones a digerir. Además ellas se alimentan de materiales en descomposición y no de materiales frescos. Por esto es necesario dejar que el desecho orgánico se descompongan 3 a 4 días antes de que pueda ser ingerido por la lombriz.

Es importante también recordar que en el caso de la lombriz, su alimento es también su hábitat, y debe ser manejado de tal forma que permita una buena aireación. Por ejemplo, el estiércol de vaca que presenta un balance nutricional apto para el desarrollo de las lombrices, en sus estadíos iniciales no es posible para la lombriz sobrevivir por el los altos contenidos de agua. Por eso la mezcla debe incluir una buena relación de materiales de fácil descomposición con altos contenidos de humedad, pero también fuentes fibrosas para proveer de carbono y aireación.

a. Acidez del material.

Ellas son capaces de digerir la mayoría de los desechos orgánicos. Por la presencia de la glándulas de Morren, pueden regular un poco el pH del sustrato. Sin embargo materiales como la pulpa de naranja o piña con pH inicial de 3 a 3.5 no permitirán el desarrollo de las lombrices hasta 2 a 3 semanas después, en que el pH sea naturalmente regulado. En ensayos realizados por Gutiérrez, et al (1999), encontraron que después de una dos semanas las lombrices fueron capaces de adaptarse y lograron una descomposición total de los materiales. Desde el punto de vista práctico, en este caso, será necesario crearles a las lombrices un espacio donde ellas puedan refugiarse hasta que el material esté completamente

listo, o en su defecto, compostear el material en forma separada al principio, y solo agregar las lombrices cuando el material esté listo.

b. Relación C:N

Al igual que con los microorganismos, las lombrices también requieren de una buena relación C:N. Una forma práctica de aumentar las poblaciones rápidamente es la adición de una buena fuente de proteína como la semolina de arroz o el salvado de trigo.

INFRAESTRUCTURA RECOMENDADAS

Conociendo los requerimientos de hábitat de la lombriz, debemos crearle en la lombricera condiciones óptimas para su desarrollo. En Costa Rica existen algunas lombriceras a gran escala (CoopeDota, CoopeCafira, Lombritica, CoopeJorco, etc.), pero en su mayoría los productores manejan lombrices a pequeña escala. Algunos de estos productores crían sus lombrices en puro suelo con buenos resultados. Otros diseños utilizados incluyen el uso cajones de varios tamaños, con cedazos en el fondo para permitir el paso del agua y que esta no se acumule. Algunos productores están recolectando las aguas liberadas por este sistema para realizar aplicaciones foliares en sus cultivos con muy buenos resultados (productores, comunicación personal). Para realizar estas recolecciones, los cajones se elaboran con un fondo firme y una salida única donde se colecta el material.

Selección del sitio del lombricero.

Las lombrices prefieren condiciones de alta humedad relativa y sombra. Sin embargo esta condición no es indispensable. Sí es indispensable a la hora de seleccionar el sitio, considerar:

- fuentes de agua limpia
- distancia a producción de materia prima
- distancia a vecinos (ver olores)
- manejo de lixiviados.
- Disponibilidad de personal

OLORES: El problema de olores en los lombriceros es mucho menor que en un compostero. El mayor problema puede venir de la materia prima acumulada en espera de ser procesada. Para esto esta materia prima de ser posible debe ser volteada periódicamente para asegurarse una mejor aireación y disminuir el riesgo de producción de moscas, que no se da en una lombricera en proceso.

CALIDAD DEL PRODUCTO FINAL.

La pregunta siempre es cómo se compara un material composteado con o sin lombrices. Cuadros 6 y 12 muestran dos estudios realizados en Costa Rica con broza de café y con pulpa de banano respectivamente que muestran el efecto del uso de lombrices sobre el producto final. En ambos casos es posible observar que el lombricompost aumenta los contenidos de calcio de los materiales y regula el pH del producto final. Esto es

especialmente importante en el caso del banano, por ser el pH del compost de banano normalmente tan alto.

También se han reportado incrementos en la población de microorganismos, hasta alcanzar poblaciones de 10^{12}, en comparación con poblaciones de 10^{9} en compost. Esto porque las temperaturas favorecen un desarrollo de la población microbiana, y el efecto rápido sobre el tamaño de partículas y el contenido de azúcares que tiene la lombriz.

Efecto de la lombriz sobre las características final del producto puede ser un criterio más a la hora de definir que sistema de compostaje utilizar. Pero serán los criterios de manejo, infraestructura, recursos disponibles, los que en la mayoría de los casos nos ayudarán a tomar las decisiones sobre el sistema de producción a utilizar.

Cuadro 12. Comparación de pulpa de banano de elaborado con y sin lombrices

Tipo de manejo	C / N	pH	N	P	Ca	Mg	K
			%				
Compost	9,8	13,9	2,86	0,35	0,88	0,64	7,99
Vermicompost	9,8	7,9	1,33	0,24	0,8	0,75	0,9
Compost + melaza	12,8	9,74	3,24	0,37	0,71	0,57	7,05

10. USOS DE COMPOST Y VERMICOMPOST

Los principales usos del compost han sido como material estructural para relleno de jardines en Estados Unidos, como abono al suelo, para el control de enfermedades, para la biorestauración de los suelos, como co-composteador de sustratos recalcitrantes y como sustituto del bromuro de metilo en solarización de camas de fresa.

En Costa Rica es poca la investigación realizada hasta la fecha. El CICAFE ha montado varios ensayos en los que compara la aplicación de fertilizantes junto con broza descompuesta (no realmente compost) (Cuadros 12 y 14). Es claro observar que existe se logran aumentos en la producción al aplicar la mezcla d los materiales.

Este es un aspecto que más y más está tomando auge y es el incremento en la eficiencia del fertilizante químico al adicionar pequeñas dosis de compost al suelo, ya que se aumenta la retención de las sales. El efecto de los abonos orgánicos al suelo, no debe verse solo como en el desarrollo de la planta al corto plazo, pero en el efecto que este tenga sobre el suelo al largo plazo. Hasta la fecha, la mayoría de los ensayos realizados a nivel nacional, tienen una duración de 1 a 2 años a lo sumo (Cuadros 13 y 14), por lo que resulta difícil medir realmente su efecto. El cuadro 13 muestra datos de una finca productora de café a las que se agregaron dosis de broza descompuesta. Se observa un incremento en los contenido de Ca y Mg, y un leve aumento en el pH.

Cuadro 12. Efecto de la aplicación de broza descompuesta y fertilizante químico sobre la producción de café

Kg de fertilizante sintético ha^{-1}	Broza de café descompuesta (ton ha^{-1})	Producción (fan/ha)
350	0,0	33,6
350	10,0	67,2
700	0,0	61,6
700	10,0	81,8

Tomado del CICAFE, informe anual 1994.

Cuadro 13. Efecto de la aplicación de broza descompuesta sobre características de suelo

Dosis aplicada	pH	Ca	Mg	K	Al
		Cmol(+) L^{-1}			
700 Kg fórmula completa/ha	4,83	3,4	1,7	0,41	3,83
10 Ton broza descompuesta/ha	4,94	5,3	2,4	0,48	4,01

El Cuadro 14 muestra el efecto de aplicaciones de compost de Juan Viñas sobre las características físicas de la mezcla de almácigo para café, después de un año de aplicación del compost. No se ven efectos marcados de la aplicación de compost, pero el tiempo de estudio es relativamente corto para ver un efecto.

Cuadro 14. Efecto de la aplicación de dosis de compost sobre características físicas y biológicas de suelo en almácigos de café. Juan Viñas. Tesis, Saulo Rodríguez, Turrialba.

	Dosis de compost (ton ha^{-1})				
Variable	**0**	**5**	**10**	**20**	**5+fert**
Resistencia al corte kg m^{-2}	0,1	0,07	0,06	0,07	0,1
Resistencia penetración kg cm^{-2}	1,0	0,71	0,71	0,71	0,54
Densidad aparente gr cm^{-3}	0,44	0,40	0,41	0,43	0,43
% humedad gravimétrica	70,7	73,4	67,0	70,0	66,1
% materia orgánica	14,4	14,1	14,3	13,9	14,0
Biomasa microbiana	12,6	25,1	17,0	12,5	24,1

11. CONCLUSIONES Y COMENTARIOS

La producción de compost es un proceso muy reciente en el país. Sus características de manejo pueden parecer costosas en primera instancia. Sin embargo, comparado con el costo energético global de otras opciones de manejo, este resulta mucho menor.

Actualmente, algunas comunidades han respondido negativamente a la producción de compost por los problemas de olor y moscas. Sin embargo en la mayoría de los casos, se trata de plantas recién instaladas que no tienen todavía un buen control. Una legislación para la producción de compost debe desarrollarse pronto. Pero no se debe descartar esta tecnología por los errores cometidos hasta la fecha. El desarrollo del conocimiento en cualquier área toma tiempo, y las experiencias ya establecidas prueban ser exitosas y con gran potencial.

La comercialización de compost es otro aspecto que debe ser regulado, ya que en el mercado actualmente se encuentran materiales de calidades muy variables. El registro de compost para su comercialización con el Ministerio de Agricultura es un requisito a cumplir, pero no existen normas establecidas en cuanto a calidades mínimas. Productos de mala calidad y clientes insatisfechos pueden afectar negativamente futuras negociaciones con productos de buena calidad.

Si logramos un mejor manejo de los desechos orgánicos, y los re-utilizamos en producción agrícola, lograremos recuperar sistemas de suelo degradados, y podremos ayudar a mantener productividades intensivas con un costo energético menor.

12. BIBLIOGRAFÍA

Bertsch, F. 1995. La fertilidad de los suelos y su manejo. Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo. 157 p.

Block, D. 1998. Degrading pcb's through composting. Biocycle. 39(12): 45-48.

Bollo, E. 1999. Lombricultura. Una alternativa de reciclaje. Soboc, Grafic. Ecuador. 149 p.

Ferruzi, C. 1994. Manual de lombricultura. Ediciones Mundi-Prensa. 138 p.

Gies, G. 1992. Regulating compost quality in Ontario. Biocycle 60-61 p.

Henry, C.L. 1991. Review of composting literature. Technical Information on the use of organic materials as soil amendments: a literature review. Solid Waste Composting Council, Washington, D.C.

Hansen, R.C., Keener, H. M., Marugg, C., Dick, W. A. y Hoiting, H. A. J. 1993. Composting of poultry manure. In: Hoiting, H,A.J. y Keener, H. M. (Ed). Science and Engineering of Composting: Design, Environmental, Microbiological and Utilization Aspects. 131-153 p.

Ingham, E. 1998. Replacing methyl bromide with compost. Biocycle. 39 (12): 80-82.

Lavelle, P., Brussaard, L. y Hendrix, P. 1999. Earthworm management in tropical agroecosystems. Cabi Publishing.

Miller, F. C. 1993. Minimizing odor generation. In: Hoiting, H,A.J. y Keener, H. M. (Ed). Science and Engineering of Composting: Design, Environmental, Microbiological and Utilization Aspects. 219-241 p.

Gutierrez, E. Morales, D. y Soto, G. Utilización de lombrices para el manejo de la pulpa de naranja. Jornadas De Investigación, Julio, 1999.

Murillo, T. 1999. Alternativas de uso para la gallinaza. Congreso Agronómico Nacional. In: Memoria: Recursos Naturales Y Producción Animal. III Congreso Nacional de Suelos. Vol. III. p 427-436.

Okumoto, S., Murayama, T., Ozawa, Y. y Sato, M. 1997. Hacia delante. apuntes de los cuadernos de los voluntarios japoneses sobre agricultura orgánica. Proyecto de Agricultura Orgánica. Ucr-Jocv. sin p.

Paul, E. A., y Clark, F.E. 1996. Soil Microbiology and Biochemistry. 2nd Ed. Academic Press. 340 p.

Reis, M., Soliva, M., Martinez, F.X., y Monteiro, A.A. 1999. the influence of sewage slude and urea as nitrogen sources In The Composting Process of Eucalyptus Bark. International Composting Symposium. Halifax, Canadá. 67 p.

Restrepo, J. 1996. Abonos orgánicos fermentados. Experiencias de agricultores en centro américa y brasil. Oit-Cedeco. 49 p.

Rodriguez, G. y Paniagua, J. J. 1994. Horticultura orgánica: una guía basada en la experiencia en laguna de Alfaro Ruíz, Costa Rica. Fundación Güilombé. 76 p.

Rynk, R. 1992. On-Farm Composting Handbook. Northeast Regional Agricultural Engineering Service. Cooperative Extension. New York, USA. 186 p.

Salas, E., y Ramirez, C. 1999. Bioensayo microbiano para estimar los nutrimentos disponibles En Los abonos orgánicos: calibración de campo. Congreso Agronómico Nacional. In: Memoria: Recursos Naturales y Producción Animal. III Congreso Nacional de Suelos. Vol. III. p. 71.

Siles, J. 1998. El manejo de desecho de broza con lombrices californianas. Tesis Maestria. CATIE.

Smalley, C. 1998. Hard Earned Lessons On Odor Management. Biocycle 39(1):58-61.

Sasaki, S. , Alvarado, A., Y Li Kam, A. 1994. Curso Básico De Agricultura Orgánica. Proyecto De Agricultura Orgánica, Ucr-Jocv. 30 p.

Toffey, W. E. 1998. We're in the soils business, Remember!. Biocycle. 39(12):57-61.

Vandevivere, P., Y Ramirez, C. 1995. Control de calidad de abonos orgánicos por medio de bioensayos. In: Garcia, J., y Najera, J. Memoria. Simposio Centroamericano de Agricultura Orgánica. UNED, Costa Rica. 121-140 p.

APLICACIÓN DE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRAFICA EN ESTUDIOS DE FERTILIDAD DE SUELOS

Freddy Sancho M.

INTRODUCCIÓN

Aunque el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG) en agricultura es relativamente reciente, esta herramienta ha sido utilizada por otros sectores desde principios de los años 80´s. Los SIG iniciales fueron muy difícil de operar y muy costosos por lo que su mayor uso se relegó a aplicaciones en manejo de recursos naturales realizadas por grandes compañías o agencias de gobierno.

1. ASPECTOS BÁSICOS DE SIG

Un SIG en general puede ser definido como ***"un poderoso conjunto de herramientas para colectar, almacenar, revisar, transformar y desplegar datos del mundo real para una serie de propósitos en particular***" (Burrough, 1986). Los datos geográficos o espaciales representan fenómenos del mundo real en términos de su posición con respecto a un sistema de coordenadas conocido, sus atributos (color, pH, contenido de nutrimentos, incidencia de enfermedades) y sus relaciones espaciales con otros objetos lo que se describe a través de la topología.

Erróneamente, muchas veces se considera al SIG como un software que permite la manipulación de objetos espaciales. Sin embargo en su contexto más amplio, el SIG debe de estar constituido de hardware o equipo de computo, un conjunto de aplicaciones de software y una adecuada estructura organizacional que incluya personal capacitado.

El software de SIG debe permitir realizar una serie de funciones básicas tales como: a) ingreso de datos y verificación; b) almacenamiento y manejo de bases de datos; c) transformación de datos; d) reportes y presentaciones y; e) interacción con el usuario. El ingreso de datos al SIG puede provenir de información capturada de mapas, fotografías aéreas, sensores remotos y observaciones de campo. La localización muy precisa de cada uno de los elementos a analizar sobre la superficie de la tierra (geo-referencia), es crítica para el uso de SIG: En los últimos meses esta geo-referenciación se facilitó enormemente con la aparición en el mercado de Sistemas de Posicionamiento Global (GPS, siglas en inglés) de muy bajo costo y la decisión del gobierno de los Estados Unidos de América de eliminar la selectividad satelital (SA) a partir de mayo del 2000.

La estructura espacial de datos que usa la mayoría de software de SIG es bastante compleja. Los detalles técnicos acerca de cada tipo de estructura raramente necesitan ser entendidos por la mayoría de los usuarios, no obstante el conocimiento básico de cómo son construidos los bloque de información son necesarios para hacer uso del más simple software de SIG. Los dos sistemas espaciales que se usan en un SIG son el vector y el "raster" (matriz). La escogencia entre estos sistemas se deberá basar en el tipo de aplicación y la distribución espacial de las propiedades de los objetos a analizar.

Sistemas vectoriales

Un simple mapa como el mostrado en la Figura 1 está constituido por diferentes láminas de información espacial. En los sistemas vectoriales los objetos como construcciones, ubicación de calicatas o puntos de muestreo de suelos deben ser representados como puntos en el mapa. Caminos, cercas, ríos, y drenajes son mejor definidos como líneas. Una serie de líneas interconectadas pueden representar áreas en el mapa que corresponden a secciones de la finca o tipos de suelos. En la terminología de SIG los puntos, líneas y áreas son conocidos como puntos o nodos, arcos o vectores y polígonos.

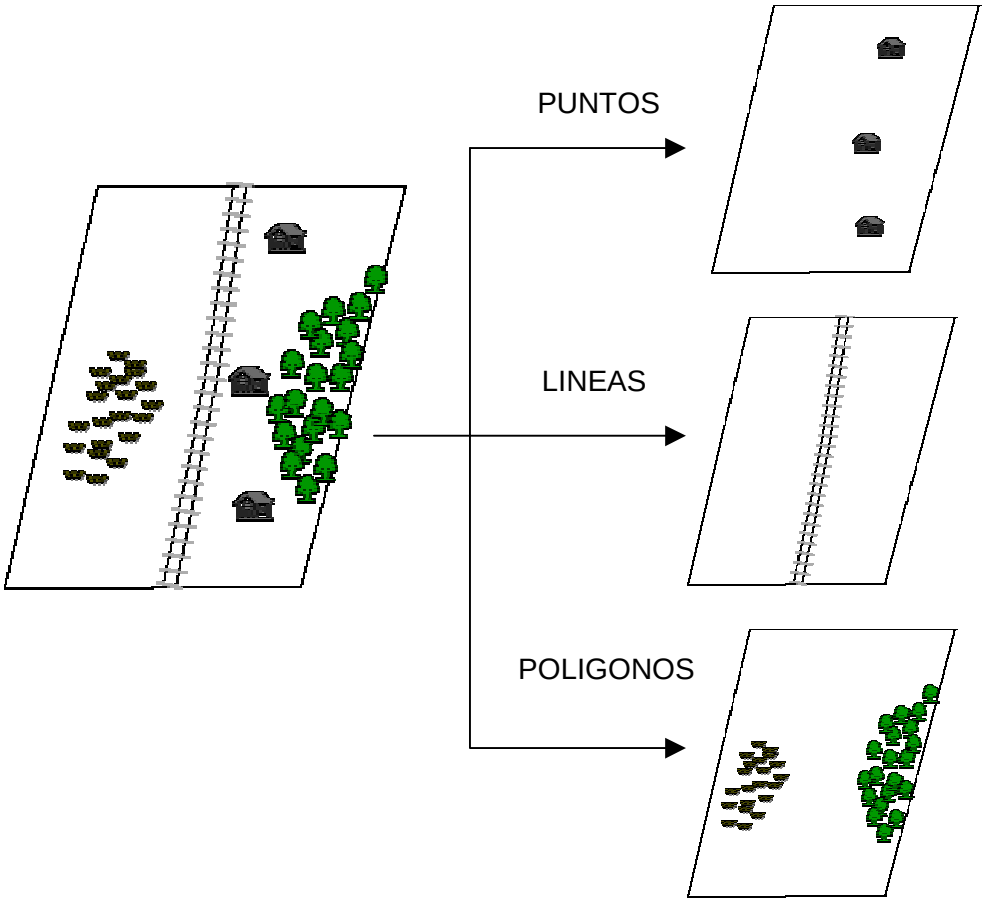
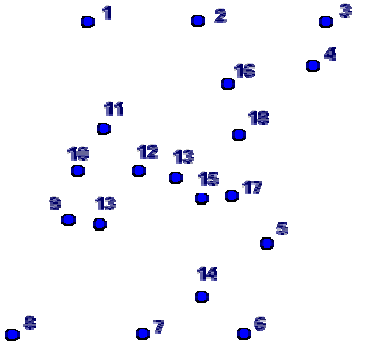


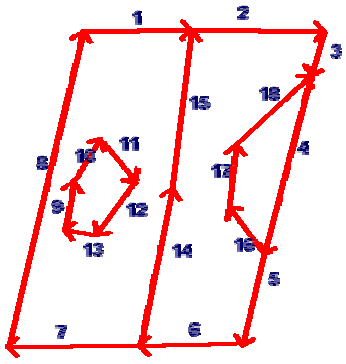
Fig. 1. Elementos básicos de un sistema vectorial

Cada uno de los tres tipos de elementos debe ser geo-referenciado siguiendo una estructura muy similar a la mostrada en la Figura 2. Las unidades vectoriales se caracterizan por el hecho de que tanto su localización geográfica como sus relaciones topológicas son muy exactas. La topología de los objetos es una de las características que actualmente no se procesa adecuadamente en la mayoría del software de SIG.



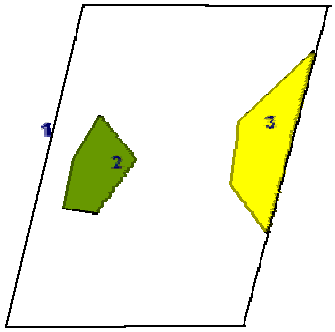
PUNTOS

ID	Atributo	X	Y
1	Nul	4994	5011
2	Nul	5012	5011
3	Nul	5011	5008
4	Nul	4993	5000
5	Nul	4995	5003
6	Nul	4998	5000
7	Nul	5000	4999
8	Nul	5002	5012
9	Nul	5002	4998
10	Nul	5005	5007
11	Nul	5005	4998
12	Nul	5005	5003
13	Nul	5003	4990
14	Casa	5008	4994
15	Casa	5006	4987
16	Casa	4998	4987
17	Nul	4988	4987
18	Nul	4992	4996
19	Nul	4995	4995



LINEAS

ID	Atributo	Nodo inicial	Nodo final
1	Borde	1	2
2	Borde	2	3
3	Borde	3	4
4	Borde	4	5
5	Borde	5	6
6	Borde	6	7
7	Borde	7	8
8	Borde	8	1
9	Pantano	9	10
10	Pantano	10	11
11	Pantano	11	12
12	Pantano	12	13
13	Pantano	13	9
14	Linea_tren	7	13
15	Linea_tren	13	14
16	Bosque	5	17
17	Bosque	17	18
18	Bosque	18	4



POLIGONOS

ID	Atributo	Arcos de borde
1	Borde	1,2,3,4,5,6,7,8
2	Pantano	9,10,11,12,13
3	Bosque	4,16,17,18

Fig. 2 . Geo-referenciación de diferentes tipos de objetos en un sistema de vector

Las unidades vectoriales no admiten variación interna; así los atributos ligados a la unidad corresponden a toda la unidad por igual. La mayoría de mapas de suelos publicados hasta hoy utilizan el polígono como su unidad geográfica. Esto implica que las clases de suelo deben ser homogéneas dentro de toda la entidad. A pesar de que por definición la mayoría

de unidades de mapeo aceptan la presencia de “otras unidades asociadas”. Por ejemplo, dos de las unidades de mapeo de mayor uso son las asociaciones y consociaciones. En estas unidades por definición se acepta la presencia de un 40 y 20% de otros tipos de suelos asociados dentro de la unidad. Cuando se representan unidades de suelos como polígonos, los límites entre estos corresponden a líneas muy finas, lo que implica que al cambiar de unidad se presentan cambios abruptos de tipo de suelo en distancias muy cortas. Este modelo es muy fácil de manejar debido a que al ubicar un sitio en el mapa se puede recuperar inmediatamente todas las características de la unidad almacenadas en la base de datos de atributos. Sin embargo, esto es científicamente inadecuado porque ignora las variaciones espaciales en procesos formadores de suelos y en el mismo suelo resultante.

Una alternativa para describir propiedades de suelo es asumir que estas varían gradualmente en el paisaje. Los suelos son muestreados en una serie de sitios y tanto la ubicación como sus atributos son almacenados. En este caso la unidad vectorial mas simple, el punto, es utilizada para representar el sitio muestreado. Posteriormente se pueden generar nuevos modelos de variación espacial a través de la interpolación que se almacenan en forma matricial o raster.

Sistemas matriciales o raster

Los sistemas matriciales son más simples de usar que los sistemas vectoriales. La forma más simple corresponde a una celda cuadrada (píxel) y la configuración regular de filas y columnas de estas celdas constituye el sistema. La resolución del sistema depende de la relación entre el tamaño de la celda y el área que esta represente sobre el terreno.

Los sistemas raster son utilizados cuando se utilizan imágenes ya sea proveniente de fotografías aéreas que se han digitalizado o partir imágenes de censores remotos. Por ejemplo, las imágenes del satélite Landsat 7 tienen una resolución espacial de 15 metros en la banda pancromática e imágenes del satélite Ikonos tienen una resolución en la banda pancromática de 1 metro. Esta excelente resolución permitirá en el futuro cercano el uso de este tipo de imágenes en la evaluación del estado nutricional o fisiológico de diferentes cultivos.

Los sistema de matriz permiten que las variaciones espaciales de lo fenómenos naturales sean representados en el arreglo con diferentes valores asignados a los píxeles, donde cada atributo se describe manera separada.

En la evaluación de la fertilidad de suelos o en la nutrición de cultivos, frecuentemente se recurre a toma de muestras de suelos o foliares que posteriormente nos indicaría el estado nutricional de un sitio en particular. Estos datos puntuales suelen ser transformados a polígonos y así representar el estado nutricional de un lote en particular. No obstante, con los SIG existe la posibilidad de aplicar técnicas de interpolación de superficies para que de esta manera datos puntuales puedan ser utilizados para desarrollar superficies continuas.

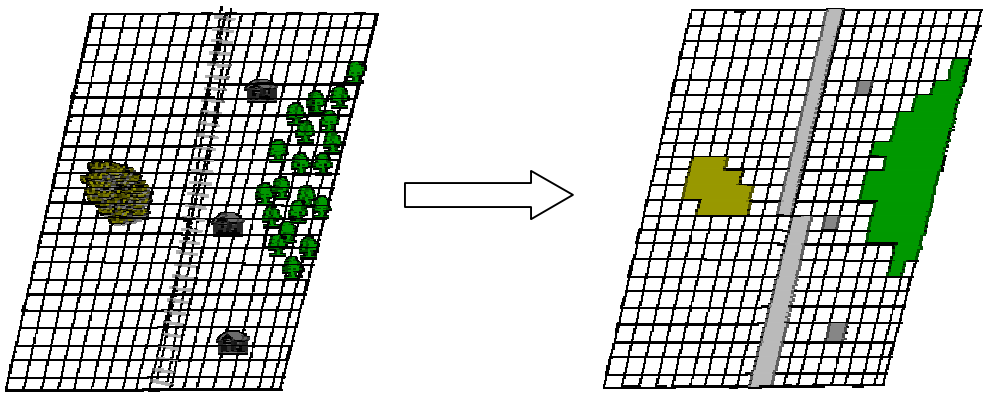


Figura 3. Representación matricial de cuerpos naturales.

2. OPERACIONES BÁSICAS EN SIG

El software de SIG actualmente disponible es muy versátil en términos de las funciones que pueden desarrollar. No obstante algunas de las funciones de mayor aplicación para estudios de fertilidad suelen ser:

a. Visualización de mapas utilizando los atributos de las unidades;
b. Agregación y simplificación;
c. Sobre-posición de mapas;
d. Interpolación de superficies;

Una herramienta muy común en el uso de SIG es la búsqueda y despliegue de unidades que reúnen ciertas características. De esta manera se podría mostrar de un mapa de suelos solo las unidades que presentan problemas de drenaje o las áreas deficientes en algún nutrimento.

La agregación y simplificación es una herramienta de uso muy común cuanto se tiene numerosas entidades con valores muy diversos en sus atributos y cuando para efectos de manejo nos interesa clasificar esa entidad en muy pocas clases. Por ejemplo de un mapa de fertilidad de suelos tenemos un rango muy amplio de valores en el contenido de nutrimentos, pero para propósitos prácticos nos interesar conocer solo aquellos sitios con contenidos bajos, medios y altos. Lo mismo podría suceder con un mapa de rendimientos de cultivo en nuestra finca.

La habilidad de sobreponer diferentes capas de datos para crear nuevos mapas es una de las herramientas más valiosas en el software de SIG. La sobre-posición aritmética puede incluir desde las operaciones básicas de suma, resta, multiplicación y división hasta

funciones trigonométricas o estadísticas más complejas. La sobre-posición lógica de objetos involucra el encontrar aquellas áreas donde una serie de condiciones ocurre o no ocurre.

La sobre-posición de entidades discretas se puede realizar con la finalidad de unir entidades, en este caso es posible definir si las nuevas entidades conservaran los atributos de ambas entidades padres o de sólo alguno de ellos. También se puede intersecar los objetos con el fin de conocer el espacio en común entre ellos o disolver el espacio de un objeto que también es ocupado por otro.

La interpolación de superficies es una herramienta muy utilizada en aplicaciones agrícolas donde se utiliza para desarrollar una superficie continua a partir de datos puntuales. Algunas de las aplicaciones más comunes son:

- Creación de mapas de rendimiento de cultivos a partir de puntos de muestreo;
- Desarrollo de mapas de aplicación variable de fertilizante basados en muestreos sistemáticos.
- Levantamiento de la topografía del terreno a partir de puntos de control medidos con equipo topográfico o con GPS.

Los principios utilizados en la interpolación de superficies son los mismos con diferencias en los algoritmos que se emplean para calcular la superficie resultante. Siempre se debe iniciar con una serie de puntos de muestreo, los cuales están geo-referenciados y con atributos claramente definidos (pH, contenido de nutrimentos, altura de plantas, textura, etc.). Los valores de estos atributos son los que se utilizan para interpolar la superficie. La selección de los algoritmos mas adecuados todavía es materia de investigación (Gotway, 1996), pero las opciones mas comunes son el ponderador de la distancia inversa (IDW), el SPLINE y análisis geo-estadíticos mas complejos como el Kriging.

3. SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO GLOBAL (GPS)

El sistema de GPS que fue desarrollado por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos, tiene como fin primordial conocer la ubicación exacta de una posición sobre la superficie de la tierra. El primer satélite para el funcionamiento del sistema fue lanzado en 1978 y en la actualidad existen 29 satélites activos. Los satélites se encuentran situados en orbitas de 20.196 kilómetros de altura con una inclinación de 55 grados con relación al ecuador. Este arreglo permite que al menos cuatro satélites estén al alcance desde cualquier superficie de la tierra.

El mecanismo de ubicación de un punto en la superficie de la tierra se basa en el principio de triangulación. Si conocemos la distancia a un punto desde tres diferentes lugares de ubicación conocida, podemos exactamente definir la ubicación de este punto. Para conocer las distancias entre el receptor de GPS y el satélite se mide el tiempo que tarda una señal emitida por el satélite en llegar al receptor. Para identificar las señales entre emisor y receptor se utilizan códigos pseudoaleatorios. Las señales de radio viajan a una velocidad de 300.000 Km. $seg.^{-1}$, por lo que para medir distancias a partir del tiempo de viaje ocuparíamos relojes atómicos de un enorme costo. Si se realiza la triangulación con tres satélites se comete un error debido a la imprecisión de los relojes. Por esta razón siempre se requiere de

la medición de un cuarto satélite (Figura 4). Entre mayor sea el número de señales que podamos percibir mayor será la precisión con la que podamos ubicar un punto sobre la superficie de la tierra. Para planear una misión con un GPS se puede fácilmente conocer que satélites estarán disponibles en una localidad determinada para cualquier día del año. Por ejemplo para el día 2 de agosto del 2001, desde San José se podrán recibir señales de varios satélites tal y como se observa en la Figura 5. El ángulo de inclinación de los satélites con respecto al punto a ubicar también es muy importante. Cuando los satélites se encuentran cercanos entre sí y con una inclinación muy fuerte (ángulos cercanos a 90°), se presenta un fuerte efecto de dilución de la precisión (DOP). Se recomienda que el efecto de dilución de precisión debe ser menor de 6. Satélites ubicados con ángulos de inclinación muy bajos (<10°) tampoco son apropiados debido a que el mayor espacio de recorrido dentro de la ionosfera produce distorsiones en el tiempo de recorrido de la señal.

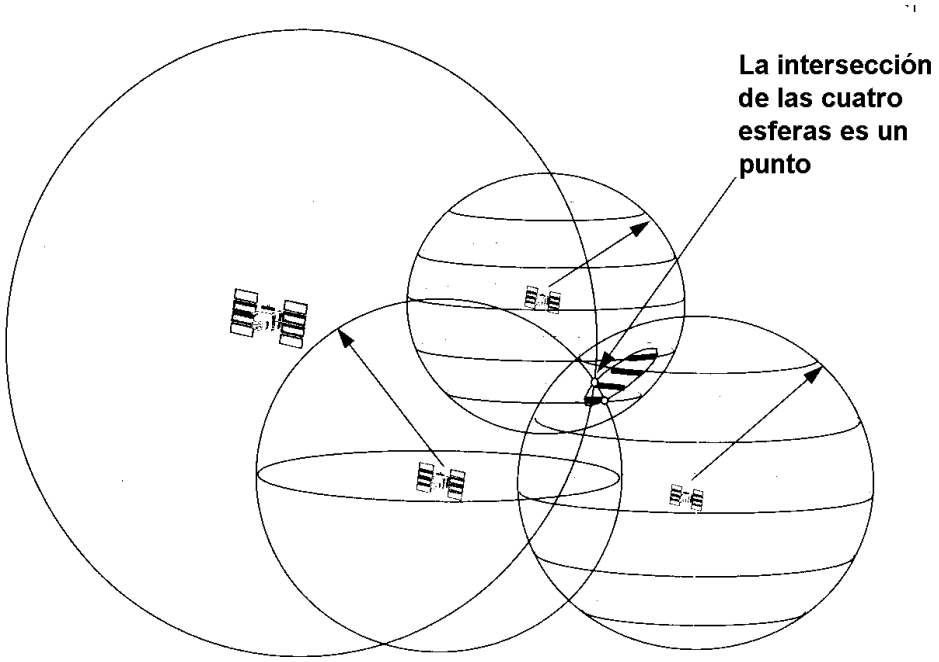


Fig. 4. Esquema de la ubicación de un punto a partir de las señales de satélite. (Fuente: Trimble, 2000).

Desde sus inicios el sistema de GPS tuvo un mayor margen de error en tiempo real causado por lo que se conoció como disponibilidad selectiva (DS). Esta DS es una distorsión en la señal provocada por el ejército de Estados Unidos como mecanismo de evitar que el sistema fuese utilizado para acciones bélicas por potencias enemigas. Dichosamente, a partir del 1 de mayo del año 2000 el gobierno norteamericano decidió eliminar esta distorsión en las señales aumentando la precisión del sistema en más de 10 veces.

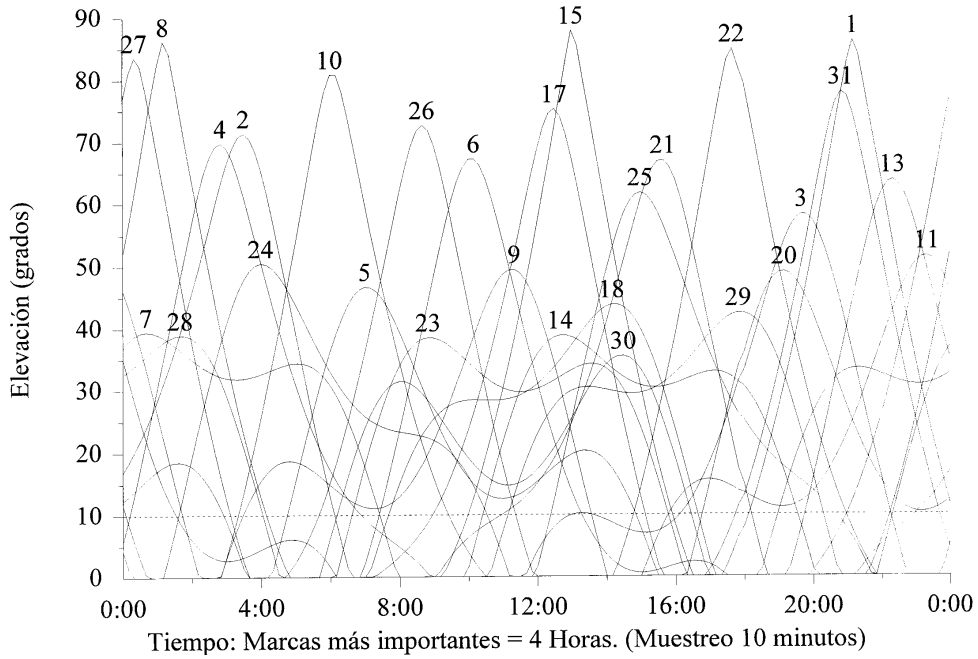


Fig. 5. Disponibilidad se señal satelital en San José el día 2 de agosto del 2001. Los números muestran la identificación de satélite y su respectiva inclinación con respecto a la ubicación de San José.

Actualmente en el mercado se pueden adquirir equipos de 12 canales de muy buena precisión y a precios muy razonables. Esto permitirá la implementación de la tecnología de GPS no sólo en el levantamiento de fertilidad de suelos, sino en todas las actividades agrícolas donde la distribución espacial de los objetos sea de importancia (incidencia de enfermedades, malas hierbas, daños por insectos, problemas de drenaje, etc.).

Con esta tecnología, la posición de los tractores agrícolas o equipo aéreo puede ser calibrada por computadora para que las densidades de siembra o la aplicación de fertilizante, u otro insumo agrícola, se realicen en las cantidades adecuadas y donde sea necesario. El impacto inmediato deberá ser una reducción de los costos de aplicación de productos y una disminución de la contaminación ambiental.

4. NUEVAS ALTERNATIVAS DE MUESTREO PARA LA CARACTERIZACION DE LA FERTILIDAD DE SUELOS

En nuestros días se está desarrollando mucha tecnología orientada a variar las aplicaciones de fertilizantes y otros agroquímicos, de acuerdo a las necesidades de los cultivos. Esta tecnología es viable cuando se reúnen las siguientes condiciones:

- existen variaciones en la respuesta a la aplicación de fertilizantes dentro de un campo de cultivo;
- las variaciones en las propiedades del suelo pueden ser espacialmente identificadas;
- se conoce como manejar estas variaciones;
- el beneficio de la aplicación variable de insumos agrícolas supera el costo de recopilar la información y responder apropiadamente.

La estrategia tradicional de muestreo de suelos se ha basado en la recolección de varias muestras de suelo de un campo. El material colectado se almacena en un recipiente que luego sirve para mezclarlo y tomar una sola sub-muestra que se envía al laboratorio. El resultado del laboratorio representa el estado nutricional de un área, que puede ser una finca, una unidad de suelos, un polígono de muestreo, o cualquier otra subdivisión de la finca. A esta técnica de muestreo se le conoce como muestreo por áreas. Con esta técnica estamos asumiendo que la variabilidad dentro de nuestra área de muestreo es menor que la variabilidad del campo completo, y que las propiedades cambian abruptamente en los límites de nuestra área.

Generalmente los puntos de sub-muestreo no son geo-referenciados por lo que difícilmente se puede repetir el esquema de muestreo. De esta manera se imposibilita el evaluar la efectividad de las prácticas de manejo basados en el muestreo de suelo. Si comparamos la técnica de muestrear y analizar las áreas en forma independiente, con la toma de una sola muestra para todo el campo o finca, sin duda alguna estamos haciendo un gran progreso. No obstante, con el conocimiento y equipo disponible hoy día el muestreo por áreas no es la mejor alternativa.

Una técnica más desarrollada de caracterización de la fertilidad de suelos se basa en el muestreo por puntos. Esta técnica consiste en recolectar sub-muestras de suelo de una área muy pequeña, que podría ser un círculo de diámetro no mayor de 5 metros. Las muestras se toman siguiendo un patrón predeterminado y cada uno se los puntos es geo-referenciado. Con este sistema, posteriormente, se estima que pasa entre los puntos de muestreo utilizando técnicas de interpolación.

Para definir el patrón de muestreo se puede recurrir a construir una cuadricula (celdas) del terreno definida según la densidad de muestreo escogida. Posteriormente para cada una de las celdas se seleccionará una sub-celda de manera aleatoria. Bajo esta técnica estamos asumiendo que se tiene muy poca a ninguna información previa de la finca. Una variante consiste en realizar un tipo de muestreo por puntos, pero dirigido. Cuando se realiza el muestreo dirigido los puntos a muestrear son seleccionados tomando en cuenta información previa como mapas de suelos, zonas de cultivo (apariencia de cultivos, presencia de enfermedades, variedades, etc.), drenajes, etc.

La apariencia de los mapas resultantes dependerá de que la densidad de muestreo, así como de la variabilidad en las propiedades del suelo y de la técnica de interpolación empleada. La mayoría de las técnicas de interpolación combinan la idea de proximidad, que se aplica por ejemplo en los polígonos de Thiesen, con el cambio gradual en la superficie de respuesta. Un método muy usado es el conocido como el ponderador del inverso de la distancia (IDW de sus siglas en inglés). En la Figura 6 se muestra un mapa de disponibilidad de fósforo en el suelo obtenido a partir de un muestreo por puntos y utilizando el método de interpolación IDW. En esta figura se puede observar como se marcan áreas concéntricas alrededor de ciertos puntos, lo que resalta el efecto de cada punto en particular sobre la superficie de respuesta. Cuando se dispone de otra información, como por ejemplo mapas de unidades de suelos, drenajes, historia previa, etc., se pueden realizar estudios de covarianza y regresión entre mapas lo cual permite mejorar los resultados obtenidos.

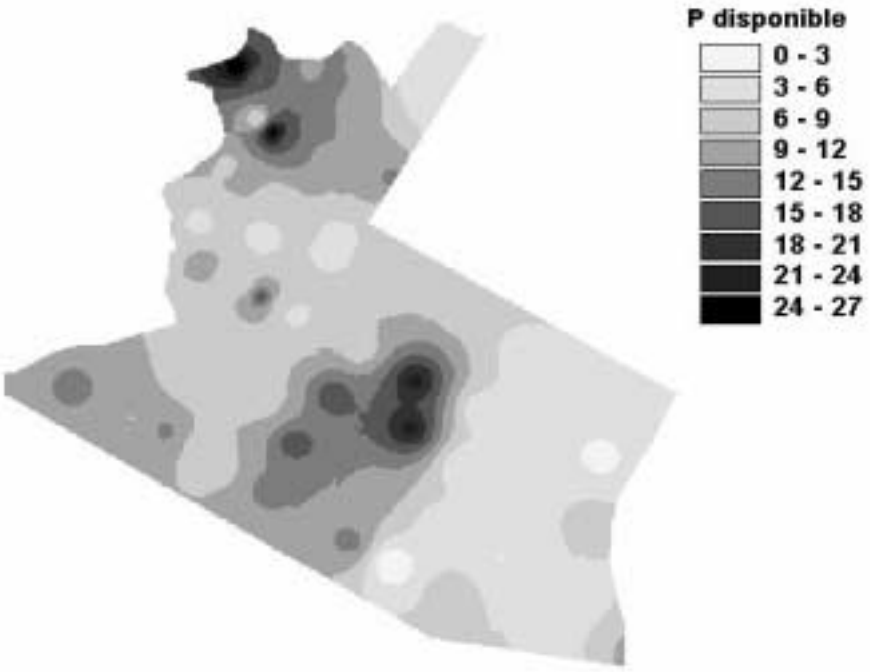


Fig. 6. Mapa de disponibilidad de fósforo desarrollado a partir de un muestreo puntual e interpolación por el ponderador del inverso de la distancia (IDW)

Una vez que se han desarrollado mapas de contenido de los nutrientes en el suelo, estos se pueden combinar para definir unidades de manejo en términos de aplicación de fertilizantes y/o enmiendas. El número apropiado de clases de manejo dependerá de la factibilidad técnica y económica de implementarlos a nivel de finca.

La combinación de los mapas de fertilidad con mapas del rendimiento de los cultivos permitirá obtener mejores conclusiones de las recomendaciones aplicadas.

Un aspecto muy importante a considerar en el muestreo por puntos es la densidad de muestreo. Utilizando SIG se puede cometer el error de obtener una resolución espacial muy alta a partir de muy pocas muestras, lo que inequívocamente conduciría a conclusiones incorrectas. Los aspectos más importantes al definir la densidad de muestreo están basados en la variabilidad de los suelos en la región, el área mínima de manejo a nivel de finca y los costos de adquisición e implementación de aplicación variable de insumos.

En agricultura de precisión en Norteamérica se recomienda una densidad de muestreo no mayor de 1 por hectárea. Esto corresponde a un intervalo de muestreo de 100 metros. Bajo condiciones locales no existe información que permita concluir sobre las densidades mas apropiadas. Sin embargo, es claro que el número de análisis requerido es bastante mayor que los que actualmente se realizan. Esto debe llamar la atención de los laboratorios o profesionales que trabajan en la evaluación de la fertilidad a desarrollar procedimientos y métodos de análisis que permitan disminuir los costos del diagnostico. También es necesario explorar la aplicabilidad de algunas otras técnicas de campo como lo son la medición de conductividad eléctrica u métodos rápidos de evaluación de campo. Algunos de estos métodos han demostrado ser muy eficientes en la recolección de información de campo que puede ser muy fácilmente correlacionada con propiedades como: salinidad, contenido de humedad en el suelo, contenido de arcillas, capacidad de intercambio de cationes, materia orgánica y presencia de capas endurecidas (Jaynes, 1996)

5. BIBLIOGRAFÍA

Burrough, P.A. y Mc. Donnell R.A. 1997. Principles of geographical information systems. Oxford University Press. Great Britain. 333.

Cahn, M.D.; Hummel, J.W. y Brouer. B.H. 1994. Spatial analysis of soil fertility for site specific crop management. Soil Science Soc. Amer. J. 58:1240-1248.

Gotway, C. A. y otros. 1996. Comparison of Krigging and inverse-distance methods for mapping soil parameters. Soil Science Soc. J. 60:1237-1247.

Jaynes. D. 1996. Improved soil mapping using electromagnetic induction surveys. In. Precision Agriculture. Proceedings of the 3rd International Conference. American Society of Agronomy. pp169-179.

Pennock D, y otros. 1999. Geographical information system in agriculture. University of Saskatchewan, Canada.

Peterson , T. 2000. Considerations in mapping soil properties or what about this grid sampling. Crop insights 6:19.

Lambert, D. y Lowenberg-DeBoer, J. 2000. Precision Agriculture profitability review. Site specific research Center, University of Purdue. 154 p.

National Research Council. 1997. Precision agriculture in the 21st century. Washington D.C., National Academic Press. 149 p.

Sawyer, J.E. 1994. Concepts of variable rate technology with considerations for fertilizer application. J. Production Agriculture 7:191-201.

Trimble. 2000. Mapping systems; general reference. Trimble Navigation Limited. California, Estados Unidos,

MANEJO DE SUELOS Y FERTILIZACIÓN DE CAFÉ

Eloy Molina

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos 40 años la investigación científica y tecnológica ha promovido un aumento considerable en los rendimientos de café por área en Costa Rica, como fruto del esfuerzo de muchos investigadores, técnicos, empresarios, productores y agricultores que integran este sector tan importante de la economía del país.

Un aspecto fundamental que se ha considerado en los programas de investigación en café es que no sólo interesa lograr un incremento en la producción, sino que también ha sido importante que este aumento se presente con una buena relación de costo/beneficio. Otro aspecto que se la ha dado énfasis en los últimos años es el de producir café al menor costo ambiental. Esto significa, entre otras cosas, conservación y manejo adecuado del suelo, uso racional de plaguicidas y nutrición mineral, aprovechamiento de residuos de café, tratamiento de aguas residuales en beneficios, etc. Uno de los factores que ha sido fundamental en el mejoramiento de la producción de café es el conocimiento que se ha obtenido del manejo de los suelos y la nutrición mineral de este cultivo. El presente trabajo tiene como objetivo revisar en forma integral algunos de los elementos más importantes que inciden en el manejo sostenible del suelo y la fertilización del cultivo.

2. SUELOS CAFETALEROS

El café se cultiva en suelos de gran diversidad en propiedades físicas y químicas, pero en general los suelos más representativos en el Valle Central y Coto Brús son aquellos derivados de cenizas volcánicas (Andisoles e Inceptisoles). En la zona sur del país predomina también los Ultisoles e Inceptisoles ácidos (Ramírez et al, 2000), y los Alfisoles en regiones cafetaleras del Valle Central Occidental y Guanacaste (Nicoya, Hojancha, Tilarán). Por sus características físicas y químicas, los suelos de origen volcánico presentan las mejores condiciones edáficas para el crecimiento y desarrollo del café, aunque la fertilidad podría ser limitante en algunos de ellos. Los Ultisoles poseen limitaciones de tipo químico que afectan al cultivo, principalmente por alta acidez y deficiencias de Ca y Mg. Los Alfisoles en general son suelos de buena fertilidad pero usualmente están ubicados en zonas climáticas poco aptas para el café, como en el caso de Guanacaste donde el período seco es muy prolongado.

Los principales problemas de fertilidad de suelos cafetaleros están relacionados con alta acidez, deficiencias de Ca y Mg, insuficiencia de K y desequilibrios iónicos entre bases. La mayoría de los Andisoles son de acidez moderada y buenas propiedades físicas. Sin embargo, en muchos casos presentan deficiencias de Ca y Mg, especialmente éste último, que afectan la producción del café. Tal es el caso de algunos suelos volcánicos ubicados en Naranjo, Grecia, Sarchí, Heredia y Turrialba. Los Andisoles de Coto Brús muestran en particular deficiencia de K debido al origen de las cenizas que formaron esos suelos y al régimen más lluvioso que promueve la lixiviación de K.

Cuadro 1. Grupos de suelos cultivados de café en Costa Rica

ORDEN	GRAN GRUPO
Andisoles	Hapludands, Haplustands, Melanudands, Fulvudands, Hydrudands, Udivitrands
Inceptisoles	Dystrustepts , Dystrudepts
Ultisoles	Hapludults, Haplustults, Paleudults, Paleustults, Haplohumults, Rhodustults, Palehumults, Kandiustults
Alfisoles	Haplustalfs, Rhodustalfs

Quizás los principales problemas que se presentan en suelos cafetaleros del país están relacionados con el incremento en la erosión, que ha causado en muchos casos la pérdida de la capa arable, disminución de la materia orgánica, decrecimiento de la profundidad efectiva, deterioro de la estructura, compactación, etc. De acuerdo con un estudio realizado por Jeffery et al (1989), el 47% de las tierras agrícolas del país se encuentran bajo condiciones de erosión hídrica que oscilan entre moderada y muy severa.

Gran parte de la caficultura del país se encuentra asentada en suelos con pendientes superiores a 15%, donde la erosión hídrica es uno de los principales factores que causan la degradación del suelo y como consecuencia, una pérdida sustancial de la productividad del cultivo. Las plantas de café establecidas en terrenos muy erosionados muestran un escaso desarrollo radical, reducción severa del crecimiento, agotamiento prematuro, y mayor susceptibilidad al ataque de plagas y enfermedades.

Los problemas de erosión en suelos cafetaleros se empezaron a incrementar con los cambios tecnológicos introducidos al final de los años 70 y principios de los 80, que incluían el aumento de densidad de siembra, el uso de variedades de mayor rendimiento, la eliminación de la sombra, y el uso de herbicidas preemergentes . Estás técnicas mejoraron la productividad del cultivo durante los primeros años de uso, pero posteriormente aceleraron también la degradación del suelo al dejarlo más expuesto a los efectos de la escorrentía superficial y la erosión laminar. Ante esta problemática es necesario la implementación de prácticas de conservación de suelos en fincas cafetaleras que incluyan medidas como canales de desagüe, siembra en contorno, terrazas, zanjas y acequias de ladera, barreras vivas, etc. Estas prácticas frenan y desvían ciertas cantidades de escorrentía y disminuyen la erosión hídrica sin ocupar demasiado espacio y reduciendo costos (Dercksen y Vahrson, 1991).

Otras medidas de conservación y rehabilitación de suelos cafetaleros muy degradados deben incluir la implementación de sombra regulada, preferiblemente de especies que produzcan gran cantidad de hojarasca, como las leguminosas. Los árboles de sombra ejercen protección del suelo a través de la formación de un mulch con residuos de ramas y hojas, lo cual contribuye también a incrementar el contenido de materia orgánica.

La incorporación de abonos o residuos orgánicos también es una práctica apropiada porque muchos de estos suelos han perdido la capa arable que era la más rica en materia

orgánica. Como consecuencia de esto la actividad microbiana y la población de organismos benéficos en el suelo se reduce considerablemente, así como otros efectos favorables de la materia orgánica como el suministro de nutrientes, la conservación de la humedad, la formación de agregados, etc.

El uso de enmiendas es recomendable porque muchos de estos suelos presentan altos niveles de acidez, especialmente en Ultisoles en donde por lo general el subsuelo expuesto por la erosión tiende a ser más ácido y más pobre en nutrientes que la capa superficial original.

3. PROBLEMAS DE RAÍZ

El sistema radical de la planta de café sirve de soporte mecánico y de absorción de agua y nutrientes minerales esenciales para su crecimiento. También se ha establecido que las raíces cumplen funciones importantes en el almacenamiento y síntesis de diferentes sustancias que intervienen en el metabolismo de la planta.

El crecimiento del sistema radical además guarda una estrecha correlación con el crecimiento vegetativo y el desarrollo reproductivo de la planta. En los últimos años se han intensificado los problemas de crecimiento de raíces, en muchas ocasiones motivados por causas patológicas, y en otros por un complejo de problemas con diversos orígenes entre los que intervienen factores de suelo, manejo y de organismos patógenos.

Uno de los problemas más serios que se ha presentado es el fenómeno conocido como "el síndrome de raíz corchosa" o "corchosis de café", en el cual parecen estar involucrados factores nutricionales que predisponen a la planta a la aparición de síntomas de decaimiento prematuro. Este problema fue identificado por primera vez en Costa Rica en Hacienda Juan Viñas en 1982 (López y Salazar, 1989), sin embargo, no fue si no hasta hace poco que se descubrió su probable agente causal (Bertrand et al, 2000).

El síndrome de raíz corchosa se caracteriza por la aparición de una declinación paulatina del crecimiento, clorosis o amarillamiento foliar, caída prematura de flores y frutos, defoliación sistemática de las plantas (paloteo) y eventualmente ocurre la muerte de la planta en un período que oscila entre 2 y 4 años (Bertsch et al, 1997).

A nivel radical se presenta una alta concentración de agallas, lesiones y deformaciones, y coloración café oscuro en raíces primarias y secundarias, y severa escasez de raíces finas. Las raíces más gruesas muestran un resquebrajamiento de la corteza en las zonas engrosadas, así como un desprendimiento parcial de la misma. Al abrir las agallas se aprecia el tejido corchoso que le ha dado su nombre al problema (Bertrand et al, 2000). Los antecedentes que existen sobre este problema, así como la sintomatología, posibles agentes causales y factores de suelo y manejo asociados con el síndrome han sido descritos por Bertsch et al (1997) y se resumen en el cuadro 2.

Cuadro 2. Sintomatología y factores asociados a la expresión de Corchosis radical en café (adaptado de Bertsch et al, 1997)

<table>
<tr><th colspan="2">SINTOMATOLOGÍA</th></tr>
<tr><td>Distribución
En parches o focos
Síntomas Aéreos:
decoloración, clorosis, amarillamiento
defoliación sistemática de las plantas, paloteo
necrosamiento de ramas y frutos
decaimiento lento de la planta
marchitez, flacidez
grupos de entrenudos cortos y grupos de entrenudos largos</td><td>Síntomas radicales:
Corchosis, alta concentración de agallas y lesiones
Deformación, engrosamiento basal de la raíz, raíz principal bifurcada
Escasez de raicillas
Raíces primarias y secundarias con coloraciones café oscuro
Pudrición de la raíz, deterioro y muerte del tejido cortical
Obstrucción del sistema de transporte</td></tr>
<tr><th colspan="2">FACTORES ASOCIADOS</th></tr>
<tr><td>Organismos asociados:
Fusarium oxysporum f.sp. coffeae
nematodos de la raíz: Meloidogyne arabicida y Pratylenchus
Cochinillas
Rosellinia sp.
Phyllophaga sp.</td><td>Manejo inadecuado del cafetal:
Mal manejo de la sombra: poca, cafetos con sombra de montaña
Manejo intensivo: altos insumos, sin o con poca sombra
Mala siembra: “cola de chancho”, sobreenterramiento
Estrés tecnológico produce predisposición (modelo de producción y manejo)</td></tr>
<tr><th>Variedades afectadas:</th><th>Condiciones de suelo asociadas:</th></tr>
<tr><td>Caturra
Catuaí
Catimor: 5175
Variedades injertadas
Canephora
Bourbon
Robusta</td><td>Alta acidez de los suelos
Niveles tóxicos de aluminio
Baja fertilidad de suelos
Desbalance nutricional
Desbalance de K en el suelo
Alto contenido de manganeso en el suelo
Bajo contenido de materia orgánica
Suelos pesados
Suelos poco profundos</td></tr>
<tr><th colspan="2">FACTORES PREDISPONENTES:</th></tr>
<tr><td colspan="2">Mayor intensidad lumínica
Mayor fotosíntesis – estrés fisiológico
Degradación del suelo – erosión
Dispersión por escorrentía de hongos y nematodos
Disminución de micro y fauna benéfica
Deficiente asimilación de nutrimentos
Estrés de producción de las plantas</td></tr>
</table>

Desde el punto de vista patológico, Bertrand y colaboradores (2000) lograron demostrar mediante ensayos de incubación y reproducción de síntomas en invernadero y campo, que el origen de corchosis en la raíz de café se debe a la asociación del nemátodo Meloidogyne arabicida con el hongo Fusarium oxysporum. De acuerdo con estos autores, raíz corchosa es un problema complejo en el que M. Arabicida tiene un papel dominante como agente que predispone al ataque subsecuente de F. oxysporum . Este nemátodo es muy agresivo y tiene la habilidad de formar masas de huevos fuera de las raíces, ocurriendo rompimiento de la peridermis radical que puede ayudar a explicar la predisposición al ataque de F. oxysporum. Pero a pesar del descubrimiento del agente causal, el síndrome de raíz corchosa parece tener implicaciones más complejas que una simple enfermedad radical. Existen una serie de factores de suelo y nutricionales que parecen predisponer a la planta al ataque del complejo nemátodo-hongo, como lo sugiere los datos del cuadro 2.

Se ha propuesto que el desbalance en la relación Fe/Mn podría ser un factor que promueve la aparición de síntomas, aunque no existe evidencia experimental que respalde esta afirmación. Sin embargo, uno de los factores de suelos que está más asociado a la presencia de raíz corchosa es la acidez. Los suelos ácidos, con alta saturación de Al, niveles altos de Fe y/o Mn, deficiencias de Ca y Mg, parecen predisponer a la raíz al ataque del síndrome. Así mismo, suelos muy erosionados, bajos en materia orgánica, ubicados en pendientes fuertes, con texturas pesadas, también están asociados al ataque del mal.

Como medida de control se sugiere enfrentar el problema con una visión integrada, que involucre además del aspecto patológico, factores de suelo y nutricionales (Bertsch et al, 1997). Entre las prácticas agronómicas que ha permitido disminuir los efectos adversos de la raíz corchosa se encuentra la implementación del encalado como medio para reducir la acidez del suelo e incrementar los contenidos de Ca y/o Mg. El encalado promueve un mejor ambiente para el crecimiento de las raíces y favorece en especial la renovación de raíces finas que son las principales responsables de la absorción de nutrientes y agua. La incorporación de abonos orgánicos también tiene un efecto estimulatorio en el crecimiento de nuevas raíces, mejora la actividad microbiana del suelo y contribuye a acomplejar elementos tóxicos como el Al y Mn.

Otras medidas que ayuden a reconstruir el suelo como las obras de conservación y control de la erosión mencionadas anteriormente y el restablecimiento de sombra regulada, pueden tener un gran impacto a mediano plazo en el control del problema y en el mejoramiento del ambiente en que se desenvuelve la raíz. El control químico con fungicidas y nematicidas no ha sido exitoso y resulta además muy costoso de implementar.

Estas y otras medidas han resultado exitosas en algunas fincas cafetaleras del país que han enfrentado el problema en forma integral y sostenible. Junto con la recuperación del sistema radical, el uso de un programa de fertilización balanceado ha sido de gran importancia para mejorar el rendimiento en áreas afectadas, y lograr plantas más vigorosas y sanas. El fraccionamiento de la fertilización en 4-5 aplicaciones al año con fuentes que suministren los elementos básicos en dosis adecuadas ha sido también de gran importancia. El abonamiento foliar también contribuye a disminuir los efectos adversos de la raíz corchosa, especialmente en plantas de alta cosecha. Generalmente los síntomas de defoliación y paloteo en las plantas se presentan con más severidad durante la etapa de

llenado de grano y maduración, por lo que el uso de fertilizantes foliares que suministren elementos como N, K, Ca, Mg y micronutrientes puede servir de complemento al abonamiento al suelo y permitir sostener el follaje y el grano en las bandolas.

3. MANEJO DE LA FERTILIZACIÓN

El cafeto de alta producción es muy exigente en nutrientes, los cuales a menudo no pueden ser suplidos por el suelo en la cantidad y velocidad que la planta requiere, por lo que es necesario acudir al uso de fertilizantes minerales. La nutrición mineral del café en nuestro país está en gran parte fundamentada en los resultados obtenidos durante más de 40 años de investigación realizada por diversas instituciones entre las que se destacan el ICAFE, MAG, UCR, CATIE, etc. Entre los elementos más importantes en la nutrición del café en Costa Rica se destacan en orden de mayor a menor importancia los siguientes nutrientes: **N>K>Mg>Ca>S>Zn=B>P.** Los requerimientos de fertilización utilizados en nuestro país se resumen en el cuadro 3.

Cuadro 3. Recomendaciones de fertilización al suelo para café

ELEMENTO	DOSIS (**kg** ha^{-1})
Nitrógeno	150 a 300
Fósforo	30 a 50
Potasio	100 a 200
Magnesio	40 a 80
Azufre	30 a 60
Boro	3 a 6 kg
Zinc	5 a 10

3.1 Nutrientes esenciales

Nitrógeno: El N tienen gran efecto en el crecimiento y rendimiento de la planta, como ha sido demostrado por numerosos autores (Carvajal, 1984, Valencia, 1999, Chaves, 1999) El N es el elemento de mayor respuesta y que se encuentra deficiente en la mayoría de los suelos cafetaleros, por lo que debe ser incluido en todo programa de fertilización. Su deficiencia provoca amarillamiento o clorosis en las hojas más viejas, defoliación, disminución del crecimiento, floración y producción de frutos El ámbito de fertilización de N oscila entre 150-300 kg ha^{-1} dependiendo del estado de crecimiento de la planta y el nivel de rendimiento. El promedio de fertilización nitrogenada para plantaciones en producción con rendimientos superiores a 40 fanegas/ha es de 300 kg N ha^{-1}, recomendación proveniente de la investigación realizada en el país, como lo muestra el cuadro 4. Sin embargo, en plantaciones de alto rendimiento la dosis podría alcanzar hasta 350 kg N ha^{-1}.

Las fuentes más comunes de N son el sulfato de amonio (21-0-0-24 S), urea (46-0-0) y nitrato de amonio (33.5-0-0), siendo éstas dós últimas las más recomendadas por su mayor contenido de N. En los últimos años se ha incrementado el uso de nitrato de amonio calcáreo (Nitramón o Magnesamón) en suelos ácidos y volcánicos, debido a su aporte

adicional de Mg y Ca. En algunos suelos de alta fertilidad sin limitaciones de acidez y bases de intercambio, el N podría ser casi el elemento exclusivo a aplicar en la nutrición del cultivo.

Fósforo: El P es importante principalmente durante las etapas de almácigo y establecimiento en el campo de las plantas. Su deficiencia se manifiesta en hojas viejas con la aparición de manchas amarillas de diversos tamaños en las cuales se observan coloraciones rojizas. En casos extremos ocurre defoliación. En cafetos adultos en producción la respuesta al P es escasa, como así lo muestran los resultados de varias investigaciones (Segura, 1990; Fonseca, 1998). Probablemente la asociación del sistema radical con micorrizas le permite a la planta el suministro de P disponible, incluso desde la etapa de almácigo (Mariscal et al, 1997).

Las recomendaciones de fertilización con P oscilan entre 30 y 50 kg P_2O_5 ha^{-1} para café en producción para suelos con menos de 15 mg/L de P disponible en Olsen. El suministro de P generalmente se realiza con fórmulas completas que incluyen como fuente principalmente fosfato diamónico (DAP 18-46-0)), aunque otras fuentes como Triple superfosfato(0-46-0) y fosfato monomónico (MAP 10-50-0) también son disponibles. En suelos con contenidos adecuados de P se puede prescindir de la aplicación de elemento, reduciendo de esta forma los costos de abonamiento.

Cuadro 4. Efecto de la fertilización con dosis crecientes de nitrógeno en la producción del cafeto en cinco localidades de Costa Rica (fan/ha, promedio de 9 cosechas) (Segura, 1990)

Dosis de N (kg ha^{-1})	Aserrí	Grecia	Orosi	San José	Tibás	% Incremento
0	43,03	15,64	19,66	40,79	39,08	100
65	46,99	29,69	20,82	45,46	41,03	111
130	48,95	24,13	21,96	50,13	42,98	119
195	50,89	25,97	23,12	54,80	44,94	126
260	52,87	26,18	24,27	59,49	46,90	133
325	54,83	24,80	25,42	64,15	48,85	138

Potasio: Después del N es el elemento más importante en la nutrición del café. La extracción de K es muy elevada en este cultivo, y sus requerimientos se elevan durante la fase de formación, llenado y maduración de grano. La deficiencia de K se manifiesta también en hojas viejas por ser un elemento móvil dentro de la planta, como un amarillamiento en bordes y puntas de hojas viejas, posteriormente las áreas cloróticas se necrosan conservando un halo amarillento alrededor. Puede haber defoliación severa, reducción del tamaño y peso de frutos, disminución del rendimiento, mayor susceptibilidad de la planta a enfermedades. Aunque en general los suelos de origen volcánico presentan

contenidos medios de K disponible, el cafeto responde muy bien a la fertilización potásica, especialmente en plantaciones de buen manejo y rendimiento. La respuesta al K es más evidente en suelos con desbalances catiónicos como los Alfisoles de Nicoya y Hojancha, en suelos muy ácidos de Turrialba y Pérez Zeledón, y suelos volcánicos de Coto Brus. La respuesta al K oscila entre 100 y 200 kg K_2O ha^{-1}, siendo las fuentes principales el KCL (0-0-60) y el K-mag (sulfato doble de potasio y magnesio 0-0-0-22-18-22 S). Se ha logrado demostrar que el K reduce la incidencia de enfermedades como en el caso de cercóspora o chasparria (Ramírez y Vásquez, 1998).

Magnesio: El Mg es un elemento que se encuentra deficiente en muchos suelos cafetaleros, principalmente en Ultisoles y Andisoles. La deficiencia de Mg en hojas de café es fácil de identificar, y se presenta como una clorosis intervenal de color bronceado al principio, que posteriormente se puede tornar amarillenta. Las nervaduras principales mantienen su color verde y el bronceamiento es generalmente más marcado en una mitad de la hoja. Uno de los efectos más importantes de deficiencia de Mg es que si los síntomas aparecen durante la etapa de llenado de grano puede causar defoliación de bandolas y fomentar la caída del grano. Los problemas de Mg es algunos suelos han sido también inducidos por desbalances nutricionales por aplicaciones de dosis altas de K en suelos bajos en Mg.

La acidificación de la banda de fertilización causada por los fertilizantes nitrogenados amoniacales también pueden promover la pérdida de Mg por lixiviación. La corrección de problemas de Mg puede hacerse en forma más permanente en el suelo con enmiendas como la cal dolomita y el óxido de magnesio (Magox). Esta última fuente contiene más de 70% de Mg, es un material muy reactivo si es finamente molido y libera el Mg rápidamente en presencia de humedad en el suelo, además de que posee alta capacidad de neutralización de la acidez del suelo (Molina, 1998). Un estudio realizado por Alfaro (1998) sobre dosis y fuentes de Mg en un suelo volcánico de Naranjo no mostró diferencias significativas entre tratamientos después de 4 cosechas, sin embargo, la dosis de 80 kg MgO utilizando Magox como fuente fue superior al resto de tratamientos. Ramírez(1999) en un estudio similar en un Andisol de Barva, Heredia, encontró respuesta significativa a la aplicación de Mg en café luego de 5 cosechas, siendo el mejor tratamiento la dosis de 88 kg MgO ha^{-1} utilizando sulfato de Mg como fuente (cuadro 5). En este mismo estudio se encontró un incremento significativo en el contenido de Mg en el suelo cuando se utilizó Magox como fuente, además de una reducción importante en la acidez del suelo. Como recomendación agronómica, la dosis de Mg sugerida varía entre 40-80 kg MgO ha^{-1}. Los fertilizantes minerales como el K-mag, sulfato de Mg (17% de MgO), nitrato de Mg (7.6-0-0-11), Kieserita (25 % MgO), etc., son muy eficientes para suplir Mg al cultivo, pero su efecto residual es escaso debido a su alta solubilidad en agua.

Calcio: Los problemas de calcio están asociados principalmente a suelos rojos muy ácidos como los Ultisoles de Pérez Zeledón y Turrialba, y algunos suelos volcánicos del Valle Central (Grecia, Naranjo, Sarchí, etc). El Ca es un nutriente inmóvil dentro de la planta y la deficiencia aparece en la parte superior de la planta o tejido nuevo como una coloración verde pálida o clorótica en los bordes de hojas nuevas, ondulación en sus márgenes, y deformación o acucharamiento. La forma más simple de corregir problemas de Ca es con el encalado, que además de corregir la acidez del suelo también suple Ca como nutriente,

siendo la fuente más común el $CaCO_3$. La dolomita y el yeso (sulfato de calcio) también son excelentes fuentes de calcio, y es posible encontrar en el mercado varias fuentes compuestas de una mezcla física de yeso con dolomita (Caliyeso y Nutrical) que han dado muy buenos resultados en café como enmienda y fuente de Ca y Mg. Como suministro de Ca la dosis recomendada puede oscilar entre 300 y 600 kg CaO/ha. Entre los fertilizantes minerales se encuentran el nitrato de calcio (15-0-0-26 CaO), nitrato de amonio calcáreo (20-0-0-7-11 CaO).

Cuadro 5. Efecto de los fertilización con magnesio en el rendimiento de café (promedio de 5 cosechas) y en la fertilidad del suelo en un Andisol en Barva, Heredia (Ramírez, 1999)

Fuente y dosis de Mg	Rendimiento Fan/ha	pH H_2O	Ca	Mg	K	Al	CIC E	Sat. Al
			----------cmol(+) L^{-1}----------					%
Testigo	56,5 a	4,5	1,1	0,3	0,38	3,02	4,8	63
Magox 60 kg MgO ha^{-1}	61,2 abc	4,6	0,9	0,6	0,38	3,15	5,03	63
Magox 120 kg MgO ha^{-1}	61,2 abc	4,8	1,8	1,1	0,48	1,57	4,95	32
Magox 180 kg MgO ha^{-1}	63,5 ab	4,7	1,3	1,6	0,43	2,27	5,6	40
Magox 240 kg MgO ha^{-1}	59,6 bc	4,9	1,6	2,1	0,45	2,05	6,2	33
Sulfato de Mg 22 kg MgO ha^{-1}	57,2 c	4,5	1,0	0,4	0,38	3,17	4,95	64
Sulfato de Mg 44 kg MgO ha^{-1}	60,9 abc	4,6	1,3	0,5	0,42	2,92	5,14	57
Sulfato de Mg 66 kg MgO ha^{-1}	63,8 ab	4,5	1,5	0,6	0,51	2,97	5,58	53
Sulfato de Mg 88 kg MgO ha^{-1}	65,3 a	4,6	2,1	1,0	0,46	2,97	6,53	45

Azufre: La deficiencia de S generalmente se presenta en los tejidos nuevos como una coloración verde amarillento que comienza a lo largo de la nervadura principal. Se diferencia de la deficiencia de N por el hecho que los síntomas se localizan en hojas nuevas. Los problemas de S en suelos cafetaleros están asociados a suelos muy pobres y bajos en materia orgánica, y suelos rojizos altos en bases (Alfisoles) como los de la zona cafetalera de Nicoya y Hojancha, y suelos de origen aluvial.

Las recomendaciones de S para café oscilan entre 30 y 60 kg ha^{-1}, y las fuentes más comunes son el K-mag y el sulfato de amonio que normalmente se encuentran incluidos en las fórmulas completas diseñadas para café.

Boro: El boro cumple un papel muy importante en el crecimiento y producción de café, a través de sus diferentes funciones en los procesos fisiológicos del cultivo como la iniciación y crecimiento del tejido productivo mediante la actividad meristemática, el número y diferenciación de los brotes florales, la germinación del polen y el crecimiento del tubo polínico, el transporte de carbohidratos, el crecimiento de raíces y frutos, etc.

La deficiencia de B se presenta en hojas nuevas con la aparición de deformaciones y arrugamientos en los márgenes y puntas, clorosis y paralización del crecimiento. Es muy

característico el síntoma de formación de "palmilla" a causa de la muerte de los tejidos de crecimiento. La mayoría de los suelos ácidos y de origen volcánico son deficientes en B, por lo que la respuesta a la aplicación del elemento está ampliamente documentada a través de la investigación realizada en café desde los años 50 (Rodríguez, Alfaro y Cisneros, 1998). Las recomendaciones al suelo oscilan entre 3 y 6 kg B ha^{-1}, utilizando fuentes como Razorita, Ulexita, Borax, etc, y normalmente incluidas en las fórmulas completas. Las aplicaciones foliares también son comunes y se utilizan dosis desde 0,5 a 1,0 kg B ha^{-1}, con fuentes como Ácido bórico, Solubor, Poliboro, etc.

Zinc: El zinc es uno de los micronutrientes que con mayor frecuencia se encuentra deficiente en los suelos cafetaleros de Costa Rica. Los problemas de zinc generalmente se presentan en suelos alcalinos o de pH neutro, suelos orgánicos, suelos mal drenados y suelos muy ácidos. La deficiencia de Zn es muy común en suelos derivados de cenizas volcánicas, y en suelos con alto nivel de acidez. Los síntomas típicos se presentan en tejidos nuevos, con hojas de crecimiento escaso, en forma alargada y bordes ondulados, entrenudos cortos, clorosis intervenal, y reducción del crecimiento.

Las recomendaciones para suministrar Zn en café generalmente consisten en aspersiones foliares de sulfato de Zn o quelatos de Zn. También se ha estado utilizando en la práctica aplicaciones al suelo de sulfato de zinc con resultados promisorios, aunque las investigaciones más recientes no han encontrado respuesta consistente (Fonseca y Obando, 2000).

3.2 Época de aplicación

El fraccionamiento de la fertilización en tres o cuatro aplicaciones al año es la forma más apropiada para suplir los nutrientes esenciales para el cultivo de acuerdo con la fenología de la planta. A sí mismo el fraccionamiento aumenta la eficiencia del fertilizante. Las épocas de aplicación de fertilizantes también están determinadas en gran parte por el régimen de lluvias, ya que es necesario que exista humedad en el suelo para un mejor aprovechamiento de los nutrientes.

En el Valle Central las aplicaciones se concentran en tres fraccionamientos, los dos primeros de fórmula completa, y el última mal llamada "extra de nitrógeno", en los meses de junio-julio, agosto-setiembre, y octubre-noviembre. En zonas con régimen de lluvias más prolongado como Turrialba, Pérez Zeledón y Coto Brus, el programa de fertilización se adelanta 2-3 meses, iniciando generalmente en febrero o marzo. En zonas muy lluviosas con suelos muy livianos es más recomendable fraccionar la fertilización en 4-5 ciclos al año.

Ha sido costumbre aplicar una fórmula completa con N, P, K, Mg, S y B en las dos primeras abonadas, y una fuente nitrogenada como urea o nitrato de amonio en la última fertilización. Sin embargo, el concepto de distribución de nutrientes ha estado siendo modificado por algunos técnicos en muchos casos, con la introducción de fuentes que contienen otros nutrientes en la tradicional última abonada, como es el caso de incluir K, Mg, B, y Ca. En el cuadro 6, se muestra las fuentes principales de fertilizantes utilizados solos o mezclados en el cultivo de café en Costa Rica.

Cuadro 6. Fuentes principales de fertilizantes utilizados, solos o mezclados, en el cultivo de café en Costa Rica.

FUENTE	N	$P_2 0_5$	K_2O	MgO (%)	CaO	S	B	Zn
Nitrato de amonio	33,5	-	-	-	-	-	-	-
Urea	46	-	-	-	-	-	-	-
Sulfato de amonio	21	-	-	-	-	24	-	-
Nitramón	20	-	-	8	11	-	-	0,33
Magnesamón	22	-	-	7	11	-	-	-
Nitraboro	22	-	-	8	11	-	0,33	-
DAP	18	46	-	-	-	-	-	-
MAP	10	52	-	-	-	-	-	-
KCl	-	-	60	-	-	-	-	-
K-Mag	-	-	22	18	-	22	-	-
Sulfato de Mg	-	.	-	17	-	14		-
Kieserita	-	-	-	25	-	20	-	-
Nitrato de Mg	7,6	-	-	11	-	-	-	-
Nitrato de Ca	9	-	-	-	18	-	-	-
18-5-15-6-0.7	18	5	15	6	-	-	0,7	-
15-3-24-6-3 S	15	3	24	6	-	3	-	-
15-2.5-24-3-0.5-2 S	15	2,5	24	3	-	1	0,5	2
18-6-12-4-0,2	18	6	12	4	-	-	0,2	-

4. BIBLIOGRAFIA

Alfaro, R. 1998. Fuentes y épocas de aplicación de magnesio en café. III Seminario de resultados y avances de investigación. Ed. por L. Zamora y G. Canet, ICAFE, San José, Costa Rica. p. 87-89.

Bertrand, B.; Núñez. ; Araya, A. 2000. "Corchosis" of coffee in Costa Rica: a complex disease caused by *Meloidogyne arabicida* y *Fusarium oxysporum*. In Memoria XIX Simposio Latinoamericano de Caficultura, San José, Costa Rica, IICA/PROMECAFE. p. 405-414.

Bertsch, F. 1995. La fertilidad de los suelos y su manejo. San José, Costa Rica. Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo. 157 p.

Bertsch, F. et al. 1997. Factores nutricionales asociados a la expresión de corchosis radical en café. In Memorias XVIII Simposio Latinoamericano de Caficultura, San José, Costa Rica, IICA/PROMECAFE. p. 191-203.

Carvajal, J.F. 1984. Cafeto: Cultivo y fertilización. Instituto Internacional de la Potasa, Berna, Suiza. 253 p.

Chaves, V. 1999. Manejo de la fertilización en café. In Memoria XI Congreso Nacional Agronómico/III Congreso Nacional de Suelos, Colegio de Ingenieros Agrónomos, San José, Costa Rica, Vol. III, p. 163-173.

Dercksen, P.M.; Vahrson, W.G. 1991. Algunas consideraciones sobre las dimensiones de obras de conservación de suelos en Costa Rica. In Memoria Taller de erosión de suelos, ed. por W.G. Vahrson, M. Alfaro y G. Palacios. Proyecto MADE/FAO, Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica. p. 186-198.

Espinosa, J; Molina, E. 1999. Acidez y encalado de los suelos. Quito, Ecuador, INPOFOS. 42 p.

Fonseca, C.M. 1998. Fuente, niveles y formas de aplicación de fósforo al suelo. In Memoria III Seminario de resultados y avances de investigación. Ed. por L. Zamora y G. Canet, ICAFE, San José, Costa Rica. p. 7-14.

Fonseca, C.M.; Y Obando, J.J. 2000. Evaluación de diferentes dosis de sulfato de zinc aplicados al suelo y fuentes de zinc foliares en dos zonas cafetaleras de Costa Rica. In Memoria XIX Simposio Latinoamericano de Caficultura, San José, Costa Rica, IICA/PROMECAFE. p. 203-211.

Fournier, L.A. 1988. Fundamentos ecomorfofisiológicos de importancia en la nutrición mineral del cafeto. In Memoria curso regional sobre nutrición mineral del café, San José, Costa Rica, IICA/PROMECAFE. p.1-24.

García, P. 1997. Corchosis de la raíz del cafeto y alternativas de manejo. In Memorias XVIII Simposio Latinoamericano de Caficultura, San José, Costa Rica, IICA/PROMECAFE. p. 271-280.

Jeffery, P. Et Al. 1989. Evaluación de los estados de erosión hídrica de los suelos de Costa Rica. servicio nacional de conservación de suelos y aguas (SENACSA), San José, Costa Rica.

López, R.; Salazar, L. 1989. *Meloidogyne arabicida* nativo de Costa Rica: un nuevo y severo patógeno del cafeto. Turrialba 39(3): 313-323.

Malavolta, E. 1993. Nutricao mineral e adubacao do caffeiro. colheitas economicas máximas. Sao Paulo, Brasil, Ed. Ceres. 210 p.

Mariscal, E. et al. 1997. Evaluación del efecto de las micorrizas en almácigos de café. Memorias XVIII Simposio Latinoamericano de Caficultura, San José, Costa Rica, IICA/PROMECAFE. p. 165-169.

Molina, E. 1992. El magnesio en la nutrición del café. Revista Agroindustria 22:12-13.

Molina, E. 1998. Encalado para la corrección de la acidez del suelo. San José, Costa Rica, Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo. 45 p.

Raij, B.Van. 1991. Fertilidade do solo e adubacao. Sao Paulo. POTAFOS. 343 p.

Ramírez, G.; Vásquez, R. 1998. Efecto del potasio sobre el rendimiento de beneficiado y algunas características del grano de café. In Memoria III. Seminario de resultados y avances de investigación. Ed. L. Zamora y G. Canet, ICAFE p. 91-94.

Ramírez, J. 1999. Efecto de la fertilización con dosis crecientes de magnesio en café. In IV Seminario de avances y resultados de investigación. Ed. por L. Zamora, ICAFE, San José, Costa Rica.

Ramírez, J.; Mata, R.; Rojas, H. 2000. Caracterización de suelos cafetaleros y manejo del cultivo en el cantón de Pérez Zeledón. In Memoria XIX Simposio Latinoamericano de Caficultura, San José, C. Rica, IICA/PROMECAFE. p.139-153.

Rodríguez, O.M.; Alfaro, R.; Cisneros, B. 1998. Estudio de la respuesta a la fertilización con boro vía foliar y al suelo en café en tres localidades de Costa Rica. En Memoria III. Seminario de resultados y avances de investigación. Ed. por L. Zamora y G. Canet, ICAFE, San José, Costa Rica. p. 29-36.

Segura, A. 1990. Nutrición mineral del cafeto. In 40 años de investigación y transferencia de tecnología en café. Programa Cooperativo ICAFE-MAG, San José, Costa Rica. p. 37-58.

Valencia, G. 1998. Manual de Nutrición y Fertilizción del Café. INPOFOS. 61 p.

MANEJO DE SUELOS Y FERTILIZACIÓN DE ARROZ

José Hernán Rodríguez

1. INTRODUCCIÓN

La actividad arrocera en Costa Rica constituye un renglón de mucha importancia dentro del sector agrícola, en donde la necesidad de lograr altos rendimientos sin un incremento desmedido en los costos de producción ha obligado a mantener activa la investigación en las prácticas culturales del cultivo, dependiendo cada vez más de la utilización de insumos y tecnologías modernas.

El manejo de suelos y la fertilización del cultivo de arroz es un factor de los más importantes, en donde los productores e industriales tienen un único objetivo: *Obtener el máximo rendimiento con la mayor eficiencia en el uso de los fertilizantes, que les permita ser competitivos bajo las condiciones actuales del mercado.*

Por otra parte, en Costa Rica el arroz es un alimento básico de la dieta alimentaria, consumiendo aproximadamente 54 Kg. per cápita/año de arroz oro. En otros términos se afirma que el arroz constituye el 40% de la fuente de calorías para la población mundial.

Zonas de ubicación en el país

Según estadísticas suministradas por la Oficina del Arroz, para la temporada 1999-2000, el total de hectáreas sembradas en Costa Rica fue de 67 531. Del área total, 48 126 hectáreas corresponden a la primera siembra y 19 405 hectáreas a la segunda siembra con la distribución en porcentaje por zona indicada en el siguiente cuadro.

Cuadro 1. Cultivo de arroz en Costa Rica, área según zona de cultivo

ZONA	AREA	
	ha	%
CHOROTEGA	30 571	45,27
BRUNCA	14 776	21,88
HUETAR NORTE	13 391	19,83
PACÍFICO CENTRAL	8 327	12,33
HUETAR ATLÁNTICA	466	0,69
TOTAL	67 531	100

Dentro de la región CHOROTEGA se encuentran los cantones de Abangares, Bagaces, Cañas, Carrillo, La Cruz, Liberia, Nandayure, Nicoya y Santa Cruz. En la región BRUNCA se encuentran los cantones de Corredores, Osa y Golfito, en la región HUETAR NORTE, los cantones de San Carlos, Upala, Los Chiles y Guatuso. En la región PACÍFICO CENTRAL, los cantones de Aguirre, Parrita, Puntarenas, Garabito, Orotina, San Mateo y Esparza.

Del área total sembrada en este período el 63% se sembró en condiciones de secano y el 37% con riego. El área sembrada bajo riego en el período 1999/2000 alcanzó 25 092 hectáreas (37% del total), las cuales casi en su totalidad se ubican en la región Chorotega, el área de riego se incrementó en 2 180 ha, con respecto al período anterior.

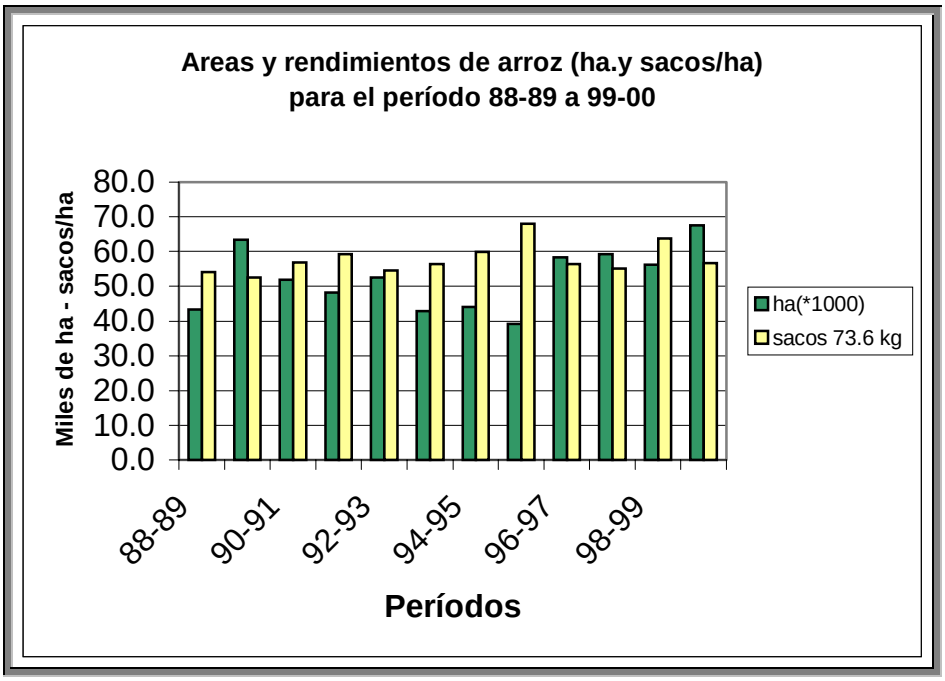


Figura 1. Área sembrada y rendimiento nacional. Períodos 1980/81 a 1999/2000

Requisitos climáticos del cultivo

Los factores climáticos de mayor importancia para el adecuado desarrollo y producción de la planta de arroz son la luminosidad, temperatura y precipitación.

- **Luminosidad:** es un cultivo bastante exigente que requiere alta luminosidad.
- **Temperatura:** puede variar entre 18 y 35°C, sin embargo dentro de estos límites son más adecuadas las temperaturas mayores. Las temperaturas bajas durante la floración pueden causar debilitamiento de las plantas y predisponerlas al ataque de plagas y enfermedades.
- **Precipitación:** es quizá el factor más importante por ser una planta hidrófila. Requiere un buen suministro de agua durante la germinación, macollamiento, prefloración, floración, y en la primera mitad del período de maduración. Es por esta razón que las plantaciones anegadas (inundadas) producen mejores rendimientos. Esta planta puede crecer en terrenos inundados con la ventaja de poder almacenar el oxígeno producido en la fotosíntesis, en sacos especiales localizados en las raíces.
- **Vientos:** los vientos fuertes perjudican el cultivo, especialmente durante la formación y maduración del grano, pues provocan volcamiento de las plantas y caída de granos.
- **Altitud:** en Costa Rica el arroz se cultiva desde el nivel del mar hasta los 850 msnm.

Requisitos particulares de suelos

Los suelos ideales para el cultivo de arroz son aquellos con textura arcillosa, arcillo arenosa o arcillo limosa, de topografía muy plana si se va a sembrar anegado, o con una ligera pendiente en caso de sembrarse en secano.

Es recomendable evitar la acidez excesiva (pH menor o igual a 4,5) y la alcalinidad elevada. (pH mayor o igual a 8) El pH óptimo para el cultivo se encuentra entre 5,5 y 6,5. Una alta cantidad de sales es perjudicial para la planta, por lo que deben evitarse los terrenos afectados por el movimiento de mareas. De igual manera los suelos arenosos no son aconsejables, pues tienen poca capacidad para retener agua y producen pérdida de nutrimentos por lavado.

Para el caso de la siembra en secano, los suelos muy arcillosos como los vertisoles, son también inconvenientes, ya que durante los períodos de sequía temporal se contraen en exceso, agrietándose de tal forma que provocan ruptura de raíces.

2. PRINCIPALES ÓRDENES Y SUS CARACTERÍSTICAS.

La mayoría de los suelos arroceros están incluidos dentro de la categoría de suelos de relieve plano (según el mapa generalizado de suelos compilado por Vázquez 1979):

A-1	Suelos aluviales, bien drenados – ***Udolls, Ustolls y Ustepts***
A-2	Suelos aluviales de drenaje moderado – ***Udepts y Aquepts***
A-3	Suelos aluviales mal drenados – ***Aquepts***
A-7	Suelos de origen fluvio-lacustre, de texturas pesadas – ***Usterts y Uderts***
D-5	Suelos desarrolados sobre terrazas antiguas – ***Humults y Udults***

Los órdenes principales son **Inceptisoles, Mollisoles y Vertisoles**, y con menor área **Entisoles y Ultisoles**. A continuación una reseña de las principales características de los tipos de suelos cultivados con arroz.

ORDEN	LOCALIZACIÓN	CARACTERÍSTICAS
INCEPTISOL	Valles de los ríos en Pacífico Sur, Central y Norte, y algunas áreas en el Norte del país.	• Varían mucho según lugar • Suelos moderadamente jóvenes • Tabla de agua superficial • Condiciones de drenaje varias • Químicamente fértiles, deficiencias de K, S y Zn principalmente
VERTISOL	Pacífico Seco	• Arcillosos con alta retensión de agua • Zona depresional con mal drenaje • Materiales ricos en Si, Ca, Mg y pH alto • Fijación de K y amonio por tipo de arcilla 2:1 • Suelos profundos, negros con baja M.O. • Limitantes físicas para preparación • Fertilización con N, K, Zn y S.
MOLLISOL	Pacífico Seco	• Clasificados como los mejores del mundo • Alta fertilidad y M.O. • Suelos planos y profundos de color oscuro • Buen drenaje • Pueden haber deficiencias de P, S, Zn y Mn.
ULTISOL	Zona Norte	• Suelos más viejos del país, color rojizo • Similares a Alfisoles • Condiciones ácidas con baja fertilidad • Altos contenidos de Al y Fe • Textura arcillosa, tipo 1:1 • Tabla de agua profunda • Buen drenaje natural • Baja disponibilidad de P por fijación • Lavado de bases y nitratos • Deficiencias N, P, Ca, Mg, Zn, S
ENTISOLES	Pacífico Seco	• Suelos más jóvenes • No hay definición clara de perfiles • Zonas de deposición aluvial • Secuencia de capas de sedimentos • Poca profundidad y exceso de humedad • Susceptibles a erosión • Fertilidad variada pero generalmente baja

3. CICLO DE VIDA DEL CULTIVO

El desarrollo progresivo de la planta de arroz es un proceso fisiológico continuo que comprende un ciclo completo desde la germinación de la semilla hasta la maduración. A nivel varietal existe un patrón general que puede variar dependiendo de las características genéticas y el ambiente dentro de lo que se destaca la temperatura y el fotoperíodo.

El ciclo de vida de una planta de arroz en el trópico varía entre los 105 y 150 días. Variedades con ciclos superiores a los 150 días por lo general son sensibles al fotoperíodo y normalmente no se siembran.

El ciclo de vida del cultivo de arroz se divide en tres etapas principales:

1. **Fase Vegetativa**. Se extiende desde la germinación de la semilla hasta la iniciación de la panícula. Esta etapa se considera como una de las principales debido a que es donde se va a desarrollar el macollamiento, y además se ubica la mayor parte de la fertilización, buscando el inicio del primordio floral. Esta etapa puede variar dependiendo de la variedad desde 45 a 50 días, como el caso de la CR 5272, hasta una duración de 57 a 62 días para el caso de la CR 1113. En esta etapa de formación de la panícula son de vital importancia el nitrógeno, zinc y el potasio.
2. **Fase Reproductiva**. Desde la iniciación de la panícula hasta la floración. En condiciones normales, esta etapa tarda 30 días en todas las variedades, y es aquí donde deben estar disponibles los nutrimentos que se aplicaron en la fase anterior. En algunas ocasiones se incluye un poco de nitrógeno con el fin de darle un mayor vigor para lo que falta. Esta etapa es de mucha importancia para asegurar un buen amarre de la flor y el espigamiento, por lo tanto se busca proteger lo mejor posible de insectos y enfermedades, así como el complemento con la nutrición foliar en el adecuado suministro de fósforo y micronutrimentos, con el fin de prepararse para un excelente llenado del grano.
3. **Fase de Maduración**. Desde la floración hasta la madurez. Esta etapa dura aproximadamente 30 a 35 días.

4. SISTEMAS DE CULTIVO Y SU IMPORTANCIA EN LA FERTILIZACIÓN

Por tradición Costa Rica ha sido un país productor de arroz, y a pesar de esto la principal modalidad de siembra sigue siendo secano. A continuación un resumen de los sistemas de cultivo.

Sistemas de Cultivo

a) Arroz de secano

Siembras en condiciones secas donde generalmente no se lleva a cabo la nivelación del terreno y la humedad depende de la precipitación y puede estar expuesto a condiciones de déficit hídrico en cualquiera de sus etapas de cultivo. Dentro de esta modalidad existe también el *"secano favorecido"* es el que igualmente se cultiva a expensas de la lluvia pero que por la distribución y cantidad de precipitación, y el tipo de suelo (generalmente con más

capacidad de retención de agua) hacen que el cultivo no presente problemas por déficit hídrico.

Manejo de la Fertilización. En el cultivo de secano quizá lo más importante es la eficiencia del nitrógeno como elemento de mayor importancia para este cultivo. En esta modalidad la mayoría del fertilizante aplicado se hace al voleo y estará en condiciones limitadas de humedad. Esta condición predispone el uso del nitrato de amonio (33,5% N) como fuente ideal para el aprovechamiento y a su vez evita pérdidas por volatilización que normalmente ocurren cuando se utiliza una fuente como la Urea (46% N).

b) Arroz bajo riego

Esta modalidad ha venido tomando mucha importancia con el pasar de los años ya que generalmente los rendimientos son mejores. Como se mencionó anteriormente el 37% de lo sembrado en la temporada 99-00 fue bajo esta modalidad. En el cultivo de arroz bajo riego existen varias modalidades:

- ✓ Inundación continua con lámina estática. El agua se incluye al sistema en forma permanente manteniendo una lámina desde 3 a 10 cm. Se requiere de un manejo adecuado de otras labores culturales como el manejo de malezas y la fertilización. Este sistema normalmente requiere de nivelación y mantiene infraestructura permanente.

- ✓ Inundación continua con lámina variable. Esta variación en la lámina se da principalmente por limitaciones en la nivelación y/o disponibilidad de agua. Normalmente el consumo de agua en este sistema llega a ser superior al de lámina estática.

- ✓ Riego rotacional. La diferencia con los dos anteriores radica en la frecuencia de riego, en donde normalmente el suelo se seca entre riegos. Tiene la limitante de que el consumo de agua es mayor, el manejo de malezas se dificulta, la eficiencia del fertilizante disminuye y por consecuencia los rendimientos son menores que los dos sistemas con lámina.

- ✓ Riego corrido. Normalmente se utiliza en suelos donde no hay nivelación. Se utilizan curvas de nivel aplicando el agua desde la parte más alta del lote. Esta también puede incluir dos modalidades: flujo continuo (sin dejar que la terraza se seque) y en forma rotacional donde pueden haber etapas de limitación hídrica.

Manejo de la Fertilización

En cualquiera de los sistemas con lámina de agua permanente hay varios factores de importancia para tomar en cuenta.

- *Nivelación*: Normalmente se lleva a cabo para tener un manejo más adecuado y eficiente del agua, y esto significa variar las características físicas y químicas de la superficie del suelo donde estará el sistema radical de arroz. Empezando por ahí es de mucha importancia realizar un muestreo de suelos posterior a la preparación del lote con el fin de identificar claramente posibles alteraciones de esta capa superficial.

- *Eficiencia del nitrógeno*. Para los sistemas de lámina estática y variable el uso de una fuente como Urea (46% N) es lo más adecuado debido a que la planta de arroz tiene la capacidad de utilizar grandes cantidades de N en forma de NH_4^+ (amonio) sin pérdidas importantes por volatilización.

Principales cambios generados debido a la inundación

- Condición anaeróbica y cambio en el tipo de microorganismos.
- La planta transporta oxígeno de la parte aérea a la raíz (Ver Fig 1).
- Crecimiento de raíces laterales fibrosas en la zona de oxidación (1-2mm).
- Aumento en la disponibilidad de nutrimentos como P, K, Fe, Mn, Mo y Si
- La concentración de otros elementos como Ca y Mg puede aumentar o disminuir dependiendo de las condiciones del suelo antes y después de la inundación.
- Disminuye la concentración de elementos como N (pérdidas por volatilización, desnitrificación y lixiviación principalmente), S, Cu y Zn.

Es importante tomar en cuenta la disminución o aumento en la disponibilidad de nutrimentos a la hora de interpretar análisis de suelos en sistemas de cultivo con lámina permanente, ya que los valores obtenidos en los análisis de suelo son hechos para condiciones aeróbicas. En estas condiciones el análisis foliar es un complemento de mucha utilidad para conocer la absorción por parte del cultivo, así como los ensayos que nos permitan determinar la eficiencia de los nutrimentos en cada sistema de producción. También existe el Riego por aspersión, en donde se lleva a cabo la aspersión por medio de un pivote central que no es un sistema muy popular en la producción de arroz.

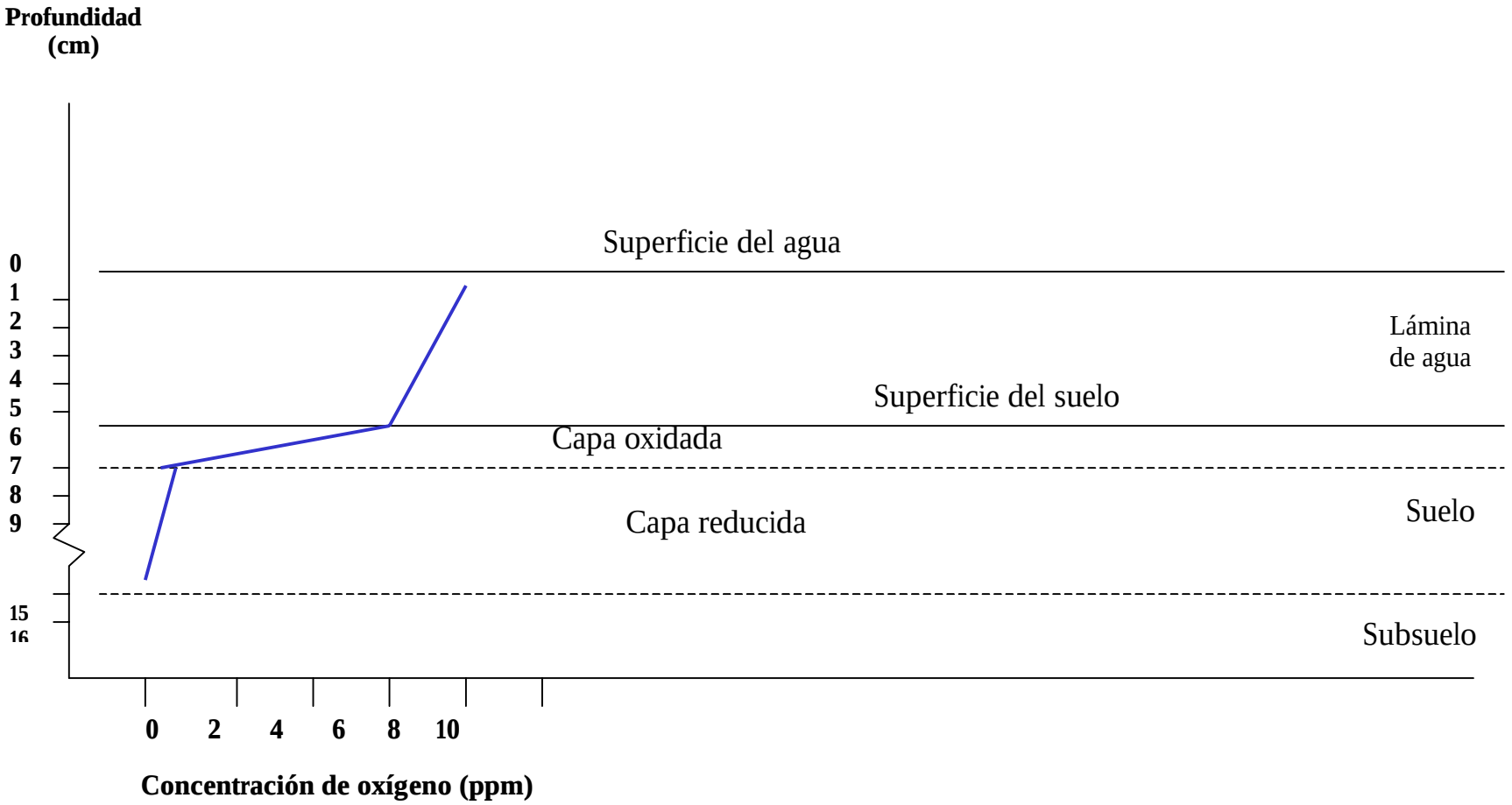


Figura 2. Concentración de oxígeno en las capas oxidada y reducida de un suelo inundado

5. MANEJO DE LA FERTILIZACIÓN DE ACUERDO CON EL CICLO DE LA VARIEDAD

Cuando se habla de manejo de la fertilización, el primer paso es el análisis de suelo. Este nos ayudará determinar las necesidades básicas del programa de fertilización, y como se mencionó anteriormente, tomando en cuenta el sistema de cultivo a emplear con el fin de determinar el grado de disponibilidad de los elementos.

Los suelos con características ácidas, como por ejemplo algunos Ultisoles de la zona de San Carlos, deben ser deben ser encalados de acuerdo con su grado de acidez, con el fin de neutralizar los iones ácidos, y de esta forma mejorar el aprovechamiento de los nutrimentos primarios. Es de mucha importancia conocer el comportamiento de cada variedad para el manejo de la fertilización; por esta razón se hace necesario hablar sobre la absorción de nutrimentos.

Absorción de nutrimentos.

La cantidad de nutrimentos removidos del suelo por una cosecha de arroz varía con el cultivar, la producción de biomasa, el suelo, el clima y el manejo. De esta forma se pueden encontrar diferencias muy grandes de extracción de nutrimentos por el arroz en diferentes condiciones y latitudes, no sólo por cantidades totales sino por distribución en el tiempo.

Específicamente en lo que respecta a absorción de nutrimentos, variedades modernas de alta producción (un promedio de 5 t ha^{-1} de grano) en general pueden remover del suelo 110 Kg N, 34 Kg P_2O_5, 156 K_2O, 23 Kg MgO, 20 Kg CaO, 5 Kg S, 2 Kg Fe, 2 Kg Mn, 200 g Zn, 150 g Cu, 150 g B, 250 Kg Si y 25 Kg de Cl por hectárea. La extracción de Si y K_2O es particularmente alta en las panículas y paja que se saca de la plantación al momento de la cosecha. Sin embargo, si sólo se remueve el grano y la paja es devuelta e incorporada de nuevo al suelo, la extracción de Si y K_2O se reduce considerablemente, aunque cantidades significativas de N y P_2O_5 sean removidos (Cuadro 2).

Cuadro 2. Porcentaje de remoción de N, P, K y Si, por la paja y el grano de arroz en variedades de alto rendimiento

PRODUCTO	N	P_2O_5	K_2O	Si
Paja	34	15	89	81
Grano	66	85	11	19

Fuente: Calculado de S.K De Datta, 1989

La información del cuadro anterior muestra que el grano remueve el mayor porcentaje de N y P, pero no así para K y Si, siendo esto de mucha importancia para el manejo adecuado de la fertilización. Para definir el manejo nutricional de una variedad determinada se debe tener un claro entendimiento de las diferentes etapas de crecimiento y desarrollo, y las necesidades nutricionales para cada una de estas etapas.

Épocas de aplicación

Como se aprecia en la **Figura 3**, la fertilización del cultivo de arroz está fundamentada en 4 épocas de aplicación.

I. **Siembra**. Los nutrimentos que se incluyan al momento de la siembra van a depender del resultado de análisis de suelo, así como de las preferencias del productor. En la mayoría de los casos se incluye todo el fósforo, que puede venir acompañado por una fracción del nitrógeno (hasta un 10% del total) y una parte del potasio (desde un 10 hasta un 30%). Esta modalidad podría variar según el gusto o las condiciones de clima imperantes al momento de la siembra:

Semilla y fertilizante en seco (día 0). Dentro de esta modalidad se pueden dar varias opciones:

- Al voleo, que puede ser manual o con voleadora mecánica, posterior a la preparación del terreno, incorporando semilla y fertilizante inmediatamente después con una rastra de discos, sin o con muy poco ángulo.
- Siembra directa. Luego de la preparación del terreno se utiliza una sembradora que normalmente incluye el fertilizante.
- Cero labranza. Se quema (ya sea con fuego o con herbicida) y se siembra con sembradora (que puede o no incluir el fertilizante) sobre la paja quemada. Es una práctica muy interesante para reducir costos y para mejorar la sostenibilidad del sistema.
- Semilla pre-germinada, en donde el fertilizante su puede utilizar antes (incorporado en la preparación de terreno) o después de la siembra, principalmente en cultivo de secano cuando ya hay una lámina de agua. En este último caso se busca que el fertilizante se ponga en contacto con el suelo cuando la planta haya desarrollado sus primeras raíces, y así lograr un mayor aprovechamiento.

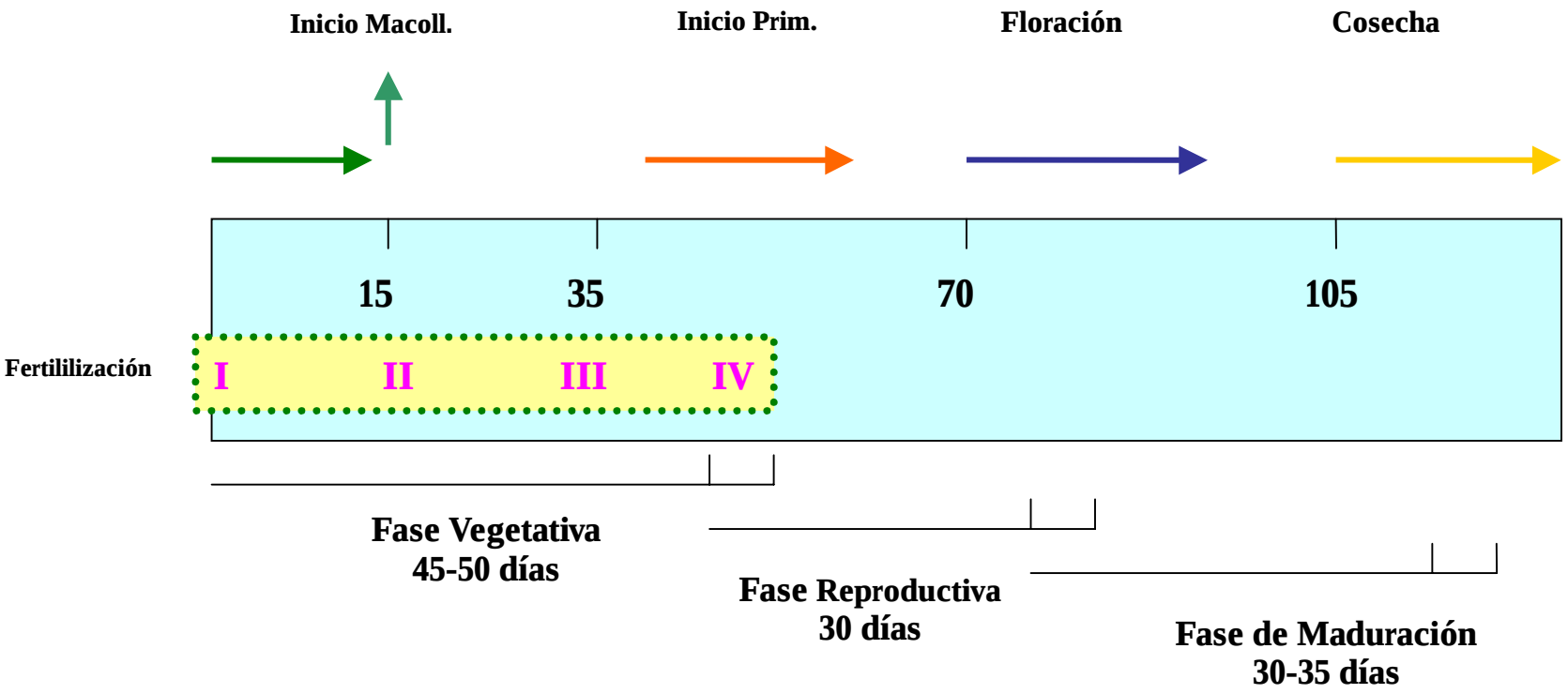
II. **15 a 25 días**. Normalmente se incluye un 20 a 25% del nitrógeno y un 30 a 35% del potasio. En caso de que el análisis denote necesidad de otros elementos como Mg, Zn y S, se puede aplicar el total en el caso de Zn, y dependiendo de la condición del suelo, una parte o el total de Mg y S, con el fin de proteger el período de mayor absorción de estos nutrimentos por la planta.

III. **35 a 40 días.** En esta etapa se busca suplir un 25% del nitrógeno y lo que queda de potasio, así como cualquier otro elemento secundario como el azufre, en caso de encontrarse limitado en el suelo.

IV. **50 a 55 días.** En esta etapa se busca completar el total de las necesidades de nitrógeno, que en algunos casos se complementa con potasio para aumentar la eficiencia en el llenado del grano y la resistencia a enfermedades.

Es importante anotar que en algunos casos, como el cultivo en suelos pesados (vertisoles), donde la capacidad de fijación de cationes ($K+$, NH_4+) por las arcillas es alta, se puede incluir una fertilización extra con un esquema fraccionado donde el período entre aplicaciones es más corto, buscando principalmente un mejor aprovechamiento.

Figura 3. Relación entre la fenología del arroz y la aplicación de fertilizantes



Fertilización Foliar

En términos generales, la nutrición foliar solamente puede complementar, y en ningún caso sustituir la fertilización al suelo, principalmente debido a que las dosis que pueden administrarse por vía foliar son muy pequeñas. Por esta razón, la fertilización foliar es una excelente alternativa para aplicar micronutrimentos, los cuales son requeridos en cantidades muy pequeñas por las plantas. Además, puede servir de complemento para el suministro de elementos mayores durante ciertos períodos definidos de crecimiento, aunque en este caso la aspersión foliar no puede sustituir la fertilización al suelo como sí sucede con los micronutrimentos. En términos generales, las aplicaciones foliares en arroz se pueden enmarcar de la siguiente forma:

NUTRIENTE	15 a 30 días	60-75 días
Zn	X	
N, P, K, Mg, S, Zn, B		X

6. BIBLIOGRAFÍA

Bertsch, F. Raun, W. Smith,T. 1991. La fertilización del cultivo de arroz bajo riego, trabajo presentado durante el II Taller sobre Manejo de suelos tropicales en Latinoamérica, San José, Costa Rica, 9-13 Julio, 1990.

Cordero, A. 1991. La fertilización del cultivo de arroz bajo riego en Costa Rica, en Segundo Taller Latinoamericano de Manejo de suelos tropicales. San José, Costa Rica.

Cordero, A. 1993. Fertilización y nutrición mineral del arroz. Editorial de la Universidad de Costa Rica.

Cordero, A.,Miner, G.S. 1975. Programa de calibración de análisis de suelo para la fertilización de arroz y maíz en Costa Rica. En Seminario sobre manejo de suelos y el proceso de desarrollo en América Tropical (1974 Cali, Colombia. Manejo de Suelos en América Tropical. San José, Costa Rica.

De Datta. S.K. 1981. Principles and Practices of Rice Productions. John Willey & Son. New York.

Greenland, D.J. 1997. The sustainability of rice farming. International Rice Reasearch Institute(IRRI)

International Rice Resarch Institute. 1979. Nitrogen and Rice. IRRI. Los Baños, Laguna, Philippines.

León, L. 1981. Química de Suelos Inundados. Centro Internacional de Agricultura Tropical, CIAT. Cali, Colombia.

Pasos, M.A. 1990. Efecto de dosis sobre el rendimiento de arroz (*Oriza sativa L*.) cv. CR1821, creciendo bajo aniego en un vertisol de Guanacaste, Costa Rica. Tesis de Ingeniero Agrónomo, Universidad de Costa Rica, sede Regional de Guanacaste.

MANEJO DE SUELOS Y FERTILIZACIÓN DEL CULTIVO DE PIÑA (*Ananas comosus*) (L) Merr.

Walter Herrera

1. INTRODUCCIÓN

La piña se ha convertido en un cultivo de gran importancia para la agricultura de exportación de Costa Rica en los últimos 10 años. El área de siembra está cercana a las 8.000 hectáreas, y continua experimentando una expansión anual importante. Algunas de las compañías transnacionales más conocidas en el mercado internacional de la comercialización de piña se encuentran asentadas en Costa Rica, tal es el caso de Maui, Del Monte y Dole. Costa Rica es uno de los mayores exportadores de fruta fresca a nivel mundial, (figura 1), con una estimación de 300 000 TM exportadas en 1998.

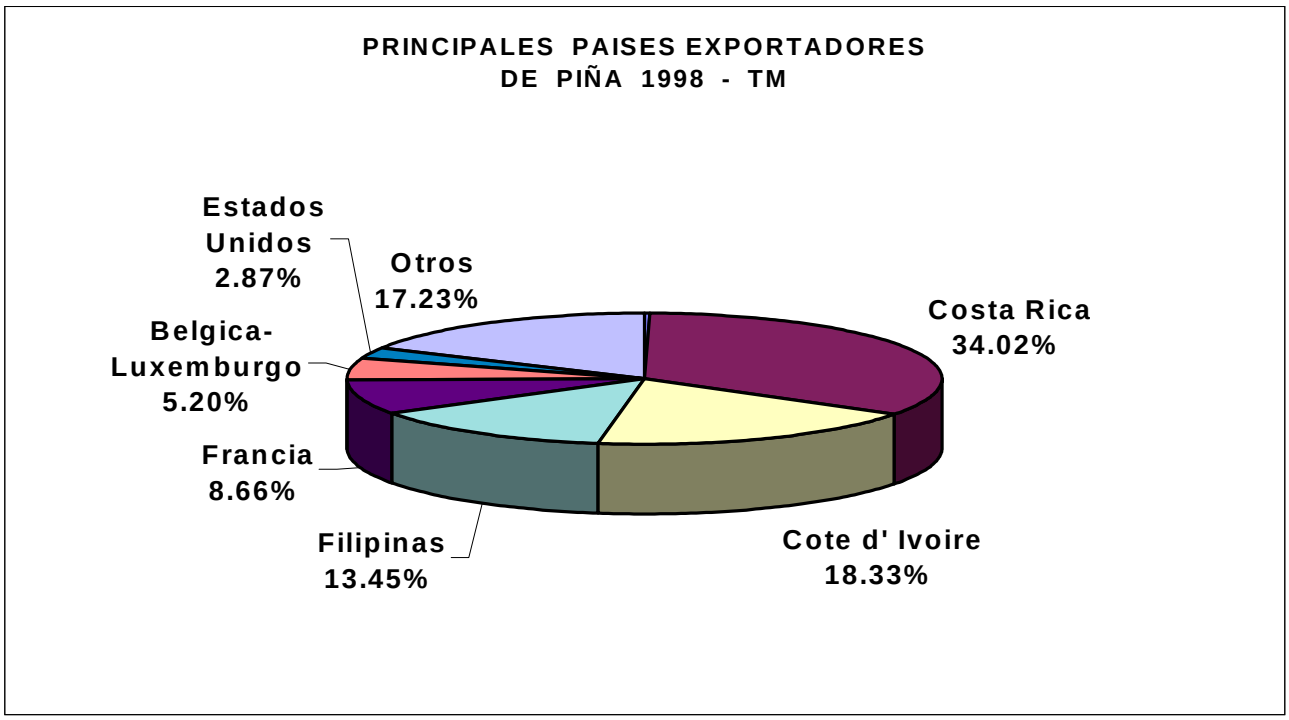


Figura 1. Principales países exportadores de piña en el mundo

Este cultivo al igual que cualquier otro para alcanzar altos rendimientos en su producción requieren además de una excelente acción de manejo, de una interacción óptima entre los factores: suelo, planta y clima.

Con respecto al clima, la temperatura óptima para el desarrollo vegetativo y alta producción del cultivo es alrededor de los 28 °C a 30 °C, en el día y no menos de 20 °C en la noche. Con temperaturas inferiores a 20 °C y superiores a los 36 °C afectan severamente al cultivo en su desarrollo.

La Luminosidad requerida por este cultivo en su rango óptimo es de 1200 a 1500 horas/año, es decir un promedio/día de 3.3 a 4.1 horas. Si la luminosidad es baja las hojas se alargan y si es excesivo el follaje se pone amarillo o rojizo. La precipitación óptima para el cultivo de Piña oscila entre los 1500 a 1800 milímetros por año, muy bien distribuidos.

En aquellas zonas de mayor precipitación es necesario establecer una adecuada red de drenaje superficial con la finalidad de evacuar el exceso de agua, ya que de existir aguas empozadas en el área de cultivo causará grandes perdidas de plantas por el ataque de ***Phytophtora cinnamoni*** y ***parasítica.***

2. MANEJO DE SUELOS

La mayoría de los suelos donde se cultiva la piña son de naturaleza ácida, y pertenecen al orden de los Ultisoles e Inceptisoles, ubicándose en Buenos Aires de Puntarenas al sur del país, y en la zona norte (San Carlos, Guácimo, Siquirres). al presentar este cultivo un sistema radical poco profundo, los suelos ideales para su desarrollo son las de texturas medias a livianas, ricos en materia orgánica, de excelente permeabilidad y con una alta disponibilidad nutricional.

No obstante los factores más determinantes para seleccionar los suelos para el cultivo de piña son el pH que debe oscilar entre 4.5 a 5.5 y de un drenaje natural con una adecuada infiltración básica.

Al presentar la planta de este cultivo un sistema radical poco profundo, se debe mecanizar los suelos en forma eficiente para favorecer la penetración y desarrollo de dicho sistema radical. Dicha preparación bajo condiciones de alta precipitación favorece enormemente la erosión de los suelos, por lo que es de suma importancia establecer las medidas pertinentes para la conservación de los suelos, como son la siembra en contorno, el uso de terrazas, entre otros, con la finalidad de evitar la perdida de la capa arable de los suelos. En el caso de no controlarse la erosión se provocará un empobrecimiento progresivo del nivel de fertilidad de los suelos y por ende la disminución acelerada del potencial de producción de los mismos.

Dado que los suelos dedicados al cultivo de piña en su gran mayoría presentan un rango de acidez de muy fuertemente ácidos a medianamente ácidos, con bajos contenidos de calcio y magnesio, se hace necesario el uso de enmiendas como es la aplicación de Carbonato de calcio o Cal Dolomítica a razón de 1.5 a 5 ton/ha, según sean los requerimientos determinados a través del análisis de suelos. Dicha aplicación a la vez permite neutralizar el efecto acidificante de los fertilizantes utilizados durante el ciclo del cultivo en los suelos, así como la reposición parcial del calcio y el magnesio en el caso de usar la Cal Dolomítica, removidos por la cosecha y perdidas a través de la lixiviación del suelo.

Por tal razón es de gran importancia determinar a través de los análisis de suelos los requerimientos de calcio y magnesio al inicio de cada ciclo de cultivo, para su debida incorporación lo cual permitirá lograr un desarrollo vegetativo vigoroso de la plantación así

como una excelente producción económicamente rentable y de alta calidad para su exportación.

Otra enmienda importante a considerar en estos suelos ácidos con altos niveles de aluminio, hierro y en algunos casos de manganeso, es la incorporación de Roca Fosfórica libre de flúor y sumamente molida, como una fuente de Fósforo, en donde estos suelos presentan una alta respuesta a su aplicación.

La roca Fosfórica a parte de la incorporación de Fósforo, también permitirá bloquear el efecto acidificante de los suelos generado por la alta concentración del Aluminio y Hierro al acomplejarlos en compuestos relativamente insolubles, lo cual proporcionará en la zona radical de la planta un medio más apropiado para su desarrollo y funcionalidad en la absorción de los nutrientes.

La aplicación de materia orgánica en estos suelos es de gran importancia, por lo que se recomienda la incorporación del total del rastrojo al final del ciclo de la cosecha, con la finalidad de aumentar el nivel de fertilidad de estos suelos y por ende su potencial de producción, sin considerar el gran beneficio que se logrará con el incremento en la actividad microbiana y su efecto antagónico sobre las plagas y enfermedades del cultivo.

Actualmente este rastrojo (250-300 ton/ha aproximadamente de materia verde) en la gran mayoría de fincas se ha estado quemando para facilitar la preparación temprana de los suelos, lo cual causa en el tiempo un empobrecimiento del nivel de fertilidad de estos suelos, de la actividad microbiana y por ende del potencial de producción de fruta de alta calidad para su exportación.

3. NUTRICIÓN MINERAL

Es necesario recordar que la acidez de los suelos es la característica mas importante directamente relacionada con el desarrollo del cultivo y la producción de fruta. Al establecer el cultivo en esta condición de acidez, los suelos en general presentan una relativa pobreza nutricional, lo cual explica la alta respuesta del cultivo ala fertilización especialmente en nitrógeno y potasio.

Este cultivo dado su gran desarrollo vegetativo y alta producción de fruta requiere una elevada demanda nutricional, en donde aparte de la cantidad incorporada, lo más importante es el momento oportuno de la aplicación de cada uno de ellos y la relación adecuada en las cantidades a aplicar.

El exceso de nitrógeno en la fertilización provoca un desarrollo exuberante de la planta, pedúnculos muy largos, reducción de la acidez y de los grados brix, así como un porcentaje bajo en la eficiencia de la inducción floral, debilitamiento de las paredes del fruto y agrietamiento, un fuerte desequilibrio nutricional y un incremento en el porcentaje de frutas abotelladas.

Una excesiva incorporación de calcio y magnesio, acentúan la deficiencia de potasio en la planta como consecuencia del antagonismo existente entre ellos. El desbalance de

potasio en la planta incrementa el porcentaje de frutos pequeños se disminuye la acidez de la fruta, el aroma y el sabor, los grados brix, el diámetro del pedúnculo, el color y la firmeza de la cáscara, entre otros.

Si el desbalance que se genera es del calcio en la planta se fomenta un debilitamiento de los tejidos del fruto, una emisión abundante de hijos debido a la muerte del punto de crecimiento de la planta madre, agrietamiento de la fruta y un excesivo crecimiento de las coronas con tejidos vegetativos frágiles.

Cuando el desbalance es del magnesio se disminuye los azúcares en la fruta madura, el grado de acidez y se afecta el color de la fruta al igual que eocurre con el desbalance de calcio.

Por estas razones es de gran importancia antes de establecer la siembra de este cultivo primero conocer el nivel de fertilidad actual de los suelos a sembrarse, con la finalidad de establecer los programas de fertilización sumamente balanceado de acuerdo con los requerimientos del cultivo y la disponibilidad nutricional de dichos suelos, así como la corrección oportuna de los desequilibrios existentes entre las bases de intercambio : K; Ca; Mg y la excesiva acidez.

Una vez establecida la siembra del cultivo con un programa de fertilización con base en un criterio agronómico adecuado se recomienda darle el seguimiento periódico al estado nutricional de la plantación por medio de análisis foliares al menos a los 5 meses de edad, con la finalidad de hacer los ajustes pertinentes al programa, incrementando aquellos elementos que se encuentran en una concentración baja en la planta.

El análisis foliar debe efectuarse siguiendo el patrón establecido de la Hoja D, la cual es la hoja más joven desarrollada y fisiológicamente activa, siendo ésta la más larga. Para el muestreo foliar se procede a seleccionar en cada lote de 3 has. en promedio unas 20 a 25 plantas, donde se extrae la Hoja D y se corta el tercio medio basal, los cuales se envían al laboratorio en una bolsa debidamente rotulada para los respectivos análisis químicos. Como guía de interpretación se han establecido parámetros para cada elemento en una concentración adecuada a nivel foliar los cuales se presentan en el cuadro 1.

Una planta bien nutrida debe presentar una coloración verde homogénea, hojas con un largo y ancho adecuado, entrenudos vigorosos y con una adecuada separación entre hojas. Antes de la inducción floral se debe lograr un desarrollo vigoroso de la plantación con un adecuado balance nutricional, lo cual es la base para obtener una alta producción de fruta, alrededor de las 120 ton/ha en primera cosecha y 80 ton/ha en segunda cosecha. Para alcanzar dicho desarrollo vegetativo y producción de fruta bajo las condiciones de nuestro país en cuanto a clima y suelos, el programa de fertilización para una población promedio de 65000 plantas/ha, se recomienda establecer para la primera cosecha en las siguientes cantidades:

Cuadro 1. Guía de interpretación de análisis foliar en piña, tercio basal de la hoja "D" (Jones, Wolf y Mills, 1991; Reuter y Robinson, 1997)

ELEMENTO	BAJO	ÓPTIMO	ALTO
N %	<1,5	1,5-2,5	> 2
P %	<0,14	0,15-0,35	>0,35
K %	<2,5	2,5-4	> 4
Ca %	<0,4	0,4-0,8	> 0,8
Mg %	<0,25	0,25-0,5	> 0,5
S %	<0,15	0,15-0,25	0,25
Cl %		0,2-0,8	
B mg Kg^{-1}	<15	15-30	30
Fe mg Kg^{-1}	<100	100-200	>200
Mn mg Kg^{-1}	<50	50-200	200-800
Zn mg Kg^{-1}	<25	25-70	>70
Cu mg Kg^{-1}		10-50	

Cuadro 2. Requerimientos nutricionales en Kg ha^{-1} / para primera cosecha en piña

N	P_2O_5	K_2O	MgO	CaO	Zn	B	Fe
550-600	250-350	450-550	60-90	560-2800	8-14	5-8	3-5

Es importante mencionar que estos niveles de fertilización son una guía ya que se requiere conocer el nivel de fertilidad de los suelos en forma detallada para establecer el programa definitivo de fertilización.

Si se tiene que incorporar calcio, éste se recomienda aplicar como carbonato de calcio con un adecuado grado de molienda: 80-100 Mesh, antes de la siembra en el último paso de rastra para su incorporación.

Todo el fósforo debe aplicarse (al suelo) a los 7 a 10 días después de la siembra con las fórmulas ya conocidas como son: 10-30-10, 12-24-12 o 18-46-0, en las dosis de 14 a 18 g/ planta según sea el nivel de fertilidad del suelo. De 30 a 45 días después de la siembra se puede usar una segunda fertilización al suelo con la fórmula: 18-5-15-6-0.7 a razón de 14 a 18 g/ planta según sea el nivel de fertilidad del suelo. En el caso de usar esta segunda fertilización al suelo, el programa de fertilización foliar se recomienda iniciar a los 60 días después de la siembra, si sólo se usa la primera aplicación al suelo, el programa de fertilización foliar debe comenzar a los 25-30 días después de la siembra.

Para incorporar los demás nutrimentos se debe establecer un programa de 15 a 17 ciclos de fertilización vía foliar con dosis crecientes para los nutrimentos de mayor requerimiento según sea la edad de la planta y con fuentes apropiadas para este cultivo.

El espaciamiento entre cada ciclo de aplicación foliar es en promedio cada 12 días. Se debe evaluar el estado nutricional de la plantación antes de la inducción floral, por medio de la técnica del muestreo foliar, con la finalidad de corregir los elementos que se encuentren en una baja concentración, con una o dos aplicaciones extras después de la inducción floral.

Para la 2° cosecha el programa de fertilización debe iniciar de 20 a 30 días después de haberse cosechado la fruta en su totalidad. La finalidad en esta etapa es lograr una alta producción de fruta económicamente rentable, alrededor de las 80 ton/ha y de excelente calidad para su exportación. Para alcanzar esta meta la plantación debe mantener un estado nutricional excelente y balanceado, por lo que se recomienda para nuestro país de acuerdo a su condición de clima y suelos, el siguiente programa de fertilización como una guía a seguir.

Cuadro 3. Requerimientos nutricionales en Kg ha^{-1} / para segunda cosecha en piña

N	P_2O_5	K_2O	MgO	Ca	Zn	B	Fe
400-450	0	350-400	40-50	5-8	5-9	3-7	2-4

En esta 2° etapa toda la nutrición mineral del cultivo es vía foliar, en donde se realizan de 10 a 12 ciclos de fertilización, espaciados en promedios cada 12 días y utilizando fuentes de alta calidad para su aplicación. Es importante recordar la necesidad de evaluar el estado nutricional de la plantación por medio de análisis foliares a los 5 meses y antes de la inducción floral con la finalidad de efectuar los ajustes pertinentes al programa establecido para corregir los elementos que se encuentran deficitarios, ya sea aplicando de uno a dos ciclos extras después de la inducción floral.

Para que el programa de fertilización en este cultivo en particular sea exitoso se requiere de un excelente manejo preventivo de las plagas y enfermedades, la evacuación rápida y eficiente del exceso de agua dentro de la plantación, así como de la aplicación oportuna de cada uno de los nutrimentos.

4. BIBLIOGRAFÍA

Bertsch, F. 1986. Manual para interpretar la fertilidad de los suelos de Costa Rica. San José, Universidad de Costa Rica. 86 p.

Bertsch, F. 1995. La fertilidad de los suelos y su manejo. San José, Costa Rica. ACCS. 157 p.

Castro, J.Z.; Hernández, C.C. 1992. Cultivo, empaque y comercilaización de la piña para exportación. IFAIN, Quito, Ecuador.

Espinosa, J; Molina, E. 1999. Acidez y encalado de los suelos. Quito, Ecuador, INPOFOS. 42 p.

Jiménez, D.J.A. 1996. El cultivo de la piña de exportación. Instituto del Trópico Húmedo de Tabasco, México.

Jones, J.; Wolf, B.; Mills, H. 1991. Plant Analysis Handbook. Micro-Macro Publishing, Georgia, USA. p. 163.

Molina, E. 1998. Encalado para la corrección de la acidez del suelo. San José, Costa Rica, Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo. 45 p.

Py, C.; Lacoeuilhe, J.J.; Teisson, C. 1987. The pineapple- cultivation and uses. Maisonneuve et Larose, Francia.

Rebolledo, A.; Uriza, D..; Rebolledo, L. 1998. Tecnología para la producción de piña en México. Folleto Técnico No. 20, INIFAP-CIRGOC, Campo Experimental Papaolopán, Veracruz, México.

Reuter, D.J.; Robinson, J.B. 1997. Plant analysis. CSIRO Publishing, 2° ed., Australia. P. 374.

Senacsa-Mag. 1989. Curso sobre conservación de suelos y aguas. Limón, Costa Rica.

MANEJO DE SUELOS Y FERTILIZACIÓN DE CAÑA DE AZÚCAR

Rafael E. Salas Camacho

1. INTRODUCCION

El rendimiento de un cultivo es el resultado de la correcta consideración de una serie de factores. Unos son propios (internos) de la planta tales como capacidad de enraizamiento, resistencia a sequía, exigencias nutricionales, etc.; que están sustentadas en el potencial genético de la planta, mientras que otros son de tipo externo. Entre estos se consideran las condiciones climáticas, características del suelo, factores nutricionales, prácticas agronómicas y otros que, de forma genérica podemos considerar como factores bióticos (malezas, microflora, microfauna, etc.).

Los factores internos vienen definidos por la variedad o estirpe utilizada, dependiendo la expresión de su potencial genético de una correcta aplicación de los factores externos. De estos, unos escapan de forma absoluta al control humano, tal es el caso de la climatología en cultivos abiertos, otros en alguna medida, pueden ser objeto de corrección (plagas), mientras que otros pueden ser controlados de forma muy eficaz, como son los factores nutricionales.

Martin-Prével y colaboradores (1983) definen la nutrición mineral como el conjunto de relaciones existentes entre determinados componentes químicos y la planta, bien en su seno como en sus interfaces con el medio exterior. Esta concepción contempla los procesos de absorción, transporte, utilización y eliminación de los nutrimentos. El crecimiento de la planta requiere el aporte adecuado de nutrimentos para su expansión y funcionamiento equilibrado. Aunque parte de los mismos puede proceder de otras zonas de la planta, un aumento en crecimiento neto dependerá de la adquisición de cantidades apropiadas de nutrimentos por la raíz y las hojas. Ello no quiere decir que la dinámica de crecimiento esté controlada únicamente por las disponibilidades de nutrimentos, sino que sus niveles de absorción vendrán determinados por la demanda derivada del crecimiento actual. Esto es cierto para la mayor parte de los macronutrimentos, lo es menos para los micronutrimentos.

La nutrición mineral de las plantas está indisolublemente unida al suelo sobre el cual ellas crecen. La fuente primaria y reserva última de nutrimentos esenciales son las rocas madres, o material parental, a partir de las cuales se han formado los suelos a través de procesos edafológicos de gran complejidad. A través de múltiples procesos interrelacionados de naturaleza física, química y biológica se produce el fenómeno de meteorización de la roca madre. La consecuencia más importante de esto es la liberación de elementos esenciales desde su forma original inerte a otras formas químicas más reactivas y de mayor solubilidad y movilidad en la fase líquida del sistema suelo. Necesariamente, en esta etapa debemos reflexionar sobre la naturaleza de los elementos químicos involucrados en estos procesos y que corresponden a los nutrimentos esenciales requeridos en general por todos los sistemas biológicos.

En el cultivo de la caña de azúcar los aspectos de suelo, clima y nutrición mineral son de gran importancia ya que al ser una planta C_4, es muy eficiente fotosintéticamente. En

las plantaciones comerciales de caña de azúcar, el productor no puede tener control de parámetros mínimos o máximos tales como precipitación, temperaturas diarias, intensidad o duración de la radiación solar. No obstante, si puede tener control en otros parámetros importantes como son el estado nutricional del cultivo, humedad del suelo, si cuenta con riego y la disponibilidad de elementos esenciales en el suelo. El manejo adecuado de todos esos parámetros manteniéndolos en niveles apropiados permitirá obtener el máximo potencial productivo del cultivo.

2. CLIMA Y SUELOS

La caña de azúcar se adapta a climas tropicales y subtropicales, no tolera heladas y el crecimiento se paraliza a temperaturas bajo los 12 C. La máxima actividad fotosintética ocurre a temperaturas del aire de 34 C (Alexander 1973). El clima ideal para variedades de 12 meses incluye al menos de 4 a 5 meses con temperaturas medias diarias de 30 a 35 C para estimular crecimiento y 1.5 a 2 meses antes de cosecha con temperaturas más frescas para promover la acumulación de azúcar (Gascho y Shih 1982). La caña de azúcar se cultivó en áreas con un amplio ámbito de temperaturas, radiación solar y tipos de suelos. Si la humedad del suelo y la nutrición de la planta son adecuados, los parámetros de radiación solar y/o temperatura pueden ser utilizados para predecir crecimiento y rendimiento del cultivo (Allen *et al.* 1978). Cuando se tiene problemas por falta de humedad en el suelo, la precipitación y/o los riegos pueden también correlacionarse con el rendimiento (Jones 1980).

La caña de azúcar es un cultivo que se adapta a varios tipos de suelo con valores de pH comprendidos entre 4 y 9 en donde los problemas nutricionales los tendremos en los valores extremos. Aún cuando algunas variedades son moderadamente tolerantes a la salinidad e inundación temporal, buen drenaje y poca salinidad son requeridos para buenos rendimientos. Se considera con respecto a la salinidad, que un valor de 1,7 dS m^{-1} es el máximo de tolerancia y que por cada unidad de salinidad arriba de ese valor la disminución en rendimiento es de 5,9% (Maas y Hoffman, 1977). Disminuciones severas en rendimiento se han presentado con valores de salinidad de 4 a 8 dS m^{-1} y casi nulo crecimiento o muerte ocurre con valores arriba de 10 dS m^{-1} (Bresler *et al.* 1982).

3. SISTEMA RADICAL

Bajo condiciones ambientales favorables el crecimiento radical tiene una elongación máxima de crecimiento de 24 mm $día^{-1}$ y paraliza su elongación cuando tiene una longitud de 120 mm (Clements 1980). La distribución del sistema radical depende del contenido de humedad y características del suelo, además de la variedad. Paz-Vergara (1980) reportó que en plantaciones irrigadas del Perú el porcentaje de raíces en los primeros 30 cm es de 48 a 68%, de 30 a 60 cm de 16 a 36%, de 60 a 90 cm de 3 a 12%; de 90 a 120 cm, 4 a 7%, de 120 a 150 cm, 1 a 7% y de 150 a 180 cm de 0,4%.

El manejo del riego también afecta el desarrollo del sistema radical ya que intervalos de riego muy cortos inducen a la planta a producir un sistema radical muy superficial. Sin embargo, una pobre aireación del suelo, también restringe el desarrollo radical (Kingston 1977).

4. REQUERIMIENTOS DE AGUA

La transpiración del cultivo es muy afectada por la cantidad de radiación solar interceptada por la parte aérea del cultivo. Con un follaje completo del cultivo, la evapotranspiración potencial es máxima hasta que el 60-70% del total del agua disponible es removida del perfil de suelo (Koehler *et al.* 1982). El tipo de suelo afecta enormemente la cantidad y distribución de agua disponible en el perfil del suelo. Muchos investigadores han reportado que la caña de azúcar puede extraer agua hasta 2,2 metros de profundidad. Sin embargo, más agua se extrae en un suelo arenoso profundo que en uno franco–arenoso o franco arcilloso. Otros factores que afectan el consumo de agua por el sistema radical, incluyen toxicidad por aluminio en el subsuelo y/o la presencia de capas u horizontes compactados que limitan el crecimiento radical disminuyendo la cantidad de agua disponible para la transpiración y aumentando la susceptibilidad del cultivo a la sequía.

5. REQUERIMIENTOS NUTRICIONALES

Debido a que la caña de azúcar tiene un largo período reproductivo y máximos ciclos de crecimiento, el cultivo tiene también grandes requerimientos nutricionales, por lo que algunas industrias cañeras aplican grandes cantidades de fertilizantes para evitar deficiencias. Coale *et al.* (1993) evaluó la absorción estacional de la caña de azúcar, reportando que la cosecha de un total de 71% de materia seca; 55, 63, 64, 25 y 38% que correspondían a N, P, K, Ca y Mg respectivamente, fueron removidos del campo. Además, indican que el fósforo y el potasio removido del campo por la cosecha eran equivalentes a 179 y 201% respectivamente del P y K aplicado.

Barnes (1974) reportó que por tonelada de caña se remueven de 0,7 a 0,9 kg de N, 0,22 a 0,26 kg de P y 1,28 kg de K. En contraste, en Hawaii, Clements (1980) indica que por tonelada de caña cosechada se extraen 0,48 kg de N, 0,09 a 0,33 kg de P y 0,75 kg de K. Estas diferencias podrían deberse a la cantidad de basura (hojas y raíces) que se transportan al ingenio, a la edad de la planta a la cosecha, y a la diferencia en la absorción de nutrimentos entre variedades (Gascho *et al.* 1993).

Pereira *et al.* (1995) en un Vertisol de Brasil, evaluó el efecto de diferentes niveles de P en el rendimiento de la caña de azúcar y encontró que el máximo rendimiento se obtuvo con una dosis de 92 kg P ha^{-1} (211 kg P_2O_5 ha^{-1}). Es bien conocido al igual que en otros cultivos, que los contenidos de nutrimentos en la caña de azúcar disminuyen con la edad de la planta y entre las diferentes partes que conforman la planta. Las concentraciones más altas de nitrógeno se dan en las plantas jóvenes y en los rebrotes y conforme se avanza en edad los contenidos decrecen debido a la producción de entrenudos con contenidos bajos de N. Las hojas también con la edad disminuyen la concentración de N, debido a la producción de tejidos estructurales y a la translocación de nutrimentos a meristemos activos.

Los cambios en la concentración de N en las hojas es bien conocido y Ayers desde 1936 reportó que la concentración de N disminuye de 1,2% en hojas jóvenes a 0,4% en hojas maduras, llegando a 0,2% en hojas senescentes aún adheridas a la planta. Clements (1980) indica que cualquier condición ambiental como por ejemplo bajas temperaturas o factor agronómico que reduzca el crecimiento, tiende a producir un aumento en la

concentración de N. La deficiencia de N en caña de azúcar tiene diferentes efectos sobre el crecimiento. La expansión de la hojas se reduce y se aumenta el intervalo de aparición y la senescencia de las hojas (Clements 1980). La fotosíntesis es menos sensitiva que el crecimiento a la deficiencia de N. Como resultado, el azúcar se acumula en las hojas e internudos. Por esa razón no se aplica fertilizante nitrogenado previo a la cosecha para incrementar así la concentración de azúcar en el tallo (Clements 1980).

Los meristemos de crecimiento requieren un suministro constante de P. Si la disponibilidad de P en el suelo no es constante y varía de acuerdo con cambios en la humedad del suelo o crecimiento radical, la planta desarrolla ciertos mecanismos que le permiten absorber y almacenar P en el tallo que posteriormente es usado en los nuevos crecimientos. Durante períodos de poca disponibilidad de P en el suelo, el P inorgánico almacenado es translocado a los meristemos. Como mucho del P en forma inorgánica en los internudos de la caña de azúcar es muy móvil, dicha concentración es más sensitiva a la nutrición con P que el P de las hojas que es predominantemente orgánico (Hartt 1972). El P en la planta al igual que el N, disminuye su concentración con la edad, debido a la disminución en la relación de tejidos meristemáticos con respecto a tejidos estructurales (Clements 1980).

La concentración de potasio en la caña de azúcar varía entre las diferentes partes de la planta y también con la edad. Como el K permanece prácticamente en solución en vez de inmovilizado en proteínas o en estructuras celulares, Clements (1980) propuso que la concentración de K en la caña de azúcar se expresara como porcentaje del contenido de agua en la planta y no en base a peso seco. El contenido de potasio en los tallos de la caña de azúcar aumenta con la edad, y los tejidos del tallo generalmente contienen más K total que las hojas verdes (Jones 1985). Como los tallos son los que se remueven del campo, la caña de azúcar tiene una alta demanda de potasio. Además, mucho del K removido del campo se concentra en ciertos subproductos que no son devueltos al campo.

El contenido de calcio en la caña de azúcar varía con la edad de la planta. Gosnell y Long (1971) indican que el contenido de calcio en vainas jóvenes de un mes de edad completamente extendidas disminuye de 0,37% a 0,25% a los 5 meses de edad. Además, estos mismos investigadores reportan que un estrés por sequía tiende a aumentar la concentración de Ca en los tejidos de las hojas. En Hawaii, Bowen (1975) reportó que el contenido de calcio en hojas inmaduras varió de 0,30% en los primeros 4 meses, a menos de 0,20% a los18 meses de edad.

El magnesio es un elemento que correlaciona negativamente y no linealmente con el crecimiento y la edad de la planta, de ahí que la evaluación de magnesio en la planta deba realizarse en la misma época y con la misma edad fisiológica del órgano a evaluar. La poca variación en concentración de magnesio de acuerdo con la edad de la planta, se da con mayor frecuencia en la hoja TVD que cuando se evalúan las vainas (Reuter 1986).

El azufre, elemento esencial para síntesis de aminoácidos, proteínas, vitaminas y algunas enzimas, ayuda a la asimilación del nitrógeno en la planta. La concentración de S en las vainas por lo general disminuye durante los primeros dos meses después de la cosecha

pasando de 0,61 a 0,08% en las vainas 3-6, para posteriormente aumentar llegando a concentraciones de 0,30 y 0,18% en vainas y hojas, respectivamente (Reuter 1986).

Los elementos menores, al igual que en otros cultivos, son importantes en la nutrición de los mismos. Sin embargo, en este caso en particular se tratará con los elementos boro y zinc, que son los elementos que en la actualidad han tomado mucho interés en la producción cañera. El boro es un micronutrimento esencial en la translocación de azúcares, síntesis de proteínas y en la formación de la pared celular. Las concentraciones de boro en la planta varían de acuerdo con la edad y el tipo de órgano que se evalúe, encontrándose que en las vainas 3 a 6 en la época de rápido crecimiento (primeros 5 meses), la concentración de boro varía entre 2 y 30 mg kg^{-1}, mientras que en las hojas la variación durante los primeros 7 meses es de 1,6 a 10 mg kg^{-1} (Reuter 1986).

El zinc es un micronutrimento importante en la biosíntesis de la planta como regulador del ácido indol-3-acético (IAA) y en la actividad de varias enzimas. Su ámbito de concentración en la planta es muy amplio y varía de acuerdo con el órgano analizado, ya que en las vainas 3 a 6 en el período de rápido crecimiento, las concentraciones oscilan entre 20 y 100 mg kg^{-1} y en las hojas en el mismo período la variación es entre 15 y 50 mg kg^{-1} (Reuter 1986).

En la actualidad se ha dado atención al elemento silicio en la nutrición de la caña de azúcar, en especial en aquellas plantaciones que crecen en suelos muy meteorizados u orgánicos bajos en sílice. El silicio ocurre en la planta en la forma de SiO_2nH_2O y juega un papel en el fortalecimiento de la pared celular. Conforme la planta madura, la absorción, translocación y deposición en las vainas y hojas aumenta. La concentración de silicio es normalmente mayor en las vainas que en las hojas, y en las hojas se concentra en las puntas y márgenes de las mismas, donde el esclerénquima marginal está fuertemente silicatado. Las plantas con deficiencia de sílice, presentan puntos elongados cloróticos que posteriormente colapsan produciendo que la hoja muera prematuramente. Se ha reportado que aplicaciones de silicato de calcio en suelos deficientes en sílice, han duplicado los rendimientos (Elawad *et al.* 1982 a, b). Sin embargo, Salazar y Rodríguez (1999) no reportan una respuesta muy limitada de la variedad Pindar a tres dosis de silicato de calcio en un Ultisol de Costa Rica.

6. MADURACIÓN

El proceso de maduración de la caña de azúcar se refiere básicamente a la acumulación de azúcar en el tallo. Numerosos estudios han reportado que en la maduración los factores climáticos tales como temperatura y radiación solar juegan un papel muy importante, así como la disponibilidad de nitrógeno y humedad en suelo y planta (Clowes y Inman-Bamber 1980).

7. COSECHA Y REBROTE

La proporción de biomasa retenida como ceniza después que el cañal es quemado varía enormemente entre plantas y partes de la planta, indicando que estudios específicos son necesarios para investigar la pérdida de biomasa cuando los residuos de cosecha son quemados. El nitrógeno por ejemplo es un elemento que se encuentra en la fracción

orgánica y es convencionalmente considerado que se volatiliza cuando la biomasa se quema, mientras que se conoce que el P, K, Ca, Mg se concentra de 10 a 50 veces más en las cenizas que en la biomasa no quemada; pero además, la pérdida de cenizas durante el quemado reduce la retención de nutrimentos en el suelo (Mitchell *et al.* 2000).

En los últimos años y debido a la escasez de mano de obra se ha intensificado la corta mecánica en algunas regiones donde se puede llevar a cabo. Además, las estrategias para disminuir el impacto ambiental de la caña de azúcar en especial por la problemática de las quemas y la tendencia mundial a conservar los residuos de cosecha han cambiado a lo denominado "cosecha en verde". Esta técnica permitirá aumentar la cantidad de materia orgánica del suelo, así como la retención de nutrimentos, lo que tendrá implicaciones en los requerimientos de fertilizantes y agua por la planta.

Scandaliaris *et al.* (2000) indica que la cobertura de residuos brinda posibilidades de realizar un manejo diferente de la plantación, con beneficios importantes para el medio ambiente, ya que no solo se gana por la eliminación de los efectos negativos de la quema sobre las poblaciones, sino que además, se destacan otros aportes producto del manejo con cobertura de rastrojos. Entre los beneficios sobresale la disminución de la erosión eólica, la reducción de las pérdidas de humedad del suelo, ventajas sobre las propiedades físicas y químicas de los suelos. También el sistema produce modificación de las temperaturas del suelo y la población de malezas. Sin embargo, también se han encontrado desventajas al sistema de cosecha en verde tales como: disminución en vigor y lentitud en el rebrote, proliferación de patógenos que causan pudrición de cepas, además, se aumenta la actividad de hongos y bacterias en el suelo a diferentes profundidades.

8. ALGUNOS RESULTADOS DE INVESTIGACIÓN EN CAÑA DE AZÚCAR

NITRÓGENO:

En la zona de Guanacaste se han realizado experimentos de fertilización con cuatro dosis de nitrógeno: 80, 120, 160, 200 kg de N ha^{-1} durante cinco cosechas consecutivas con tres órdenes de suelo (Vertisol, Inceptisol y Mollisol y tres variedades de caña de azúcar diferentes (CP 721210, SP 701284, B 74132). Los resultados demuestran que la variedad CP 721210 sembrada en el Vertisol, tiene una tendencia a disminuir con la edad de la cepa hasta un 50% la producción de caña y de azúcar ha^{-1}. Sin embargo, la dosis de 200 kg de N ha^{-1} fue la que mejor rendimiento presentó en toneladas de caña/ha, mientras que no existe un claro efecto de las dosis de N, en cuanto a rendimientos en azúcar ha^{-1}.

La variedad B 74132 ubicada en el Mollisol presentó una respuesta similar a la anterior variedad, pero con rendimientos mucho mayores. La variedad SP 701284 en el Inceptisol, presentó una tendencia menor a disminuir los rendimientos en toneladas de caña y de azúcar con la edad de la cepa. Los análisis económicos realizados indicaron que las dosis más apropiadas para esta variedad en este orden de suelo es de 120 kg de N ha^{-1}.

El efecto del fraccionamiento de la fertilización nitrogenada fue evaluado en una prueba comercial, en donde se aplicó una dosis de 140 kg de N ha^{-1}. El fraccionamiento

consistió en la aplicación de 80 kg de N ha^{-1} en los primeros 10 días y 60 kg de N ha^{-1} a los 90 días después de corta, comparada con la fertilización convencional de la finca (10 días después de corta). Los resultados obtenidos en el primer año de prueba indicaron apenas un aumento en rendimiento del 1,5% de la fertilización fraccionada con respecto a la convencional.

POTASIO:

El potasio es un nutrimento esencial para el cultivo de la caña de azúcar por lo que la extracción del mismo por parte de la planta es muy alta y así lo demuestran las altas concentraciones de potasio que se encuentran en los subproductos de la industria cañera. Sin embargo, en algunas plantaciones de caña de azúcar del país, no se incluye el potasio dentro del programa de fertilización comercial de la plantación. Este aspecto es la causa de que hoy en día una buena área de cultivo en la zona de Guanacaste, presente contenidos de potasio disponible en el suelo bastante bajos.

En algunos suelos de la Guanacaste se han encontrado disminuciones en el K disponible hasta 87,5% al cabo de 24 años de cultivo, llegando en ese lapso a concentraciones en el suelo de menos de 0,1 $cmol^{(+)}/L$, con el inconveniente de que la restitución de ese K va a demorar más tiempo, debido a la complejidad de reacciones que ocurren con el K en el suelo. En suelos Vertisoles de Guanacaste se han realizado pruebas comerciales con diferentes dosis de potasio, encontrándose que en el primer año de aplicación no se encontró respuesta a la adición del elemento. Sin embargo, al segundo año se observó una ligera mejora en la calidad de los jugos y en el tercer año, los rendimientos de azúcar ha^{-1} aumentaron en un 30%.

ZINC Y BORO:

El zinc y el boro son dos micronutrimentos que han tomado importancia en la nutrición de la caña de azúcar dado que al no ser incluidos en los programas de fertilización convencionales, su disponibilidad en el suelo ha disminuido. Por esta razón, es frecuente encontrar en el país plantaciones con deficiencias en algunos casos ocultas y en otras muy evidentes de zinc y boro.

En pruebas comerciales efectuadas con aplicaciones de zinc al suelo y foliar en Vertisoles de Guanacaste y dependiendo de la disponibilidad de zinc en el suelo, se han obtenido aumentos en rendimiento de azúcar ha^{-1} desde 2,8 hasta 7,08 ton ha^{-1}. No obstante, en otras pruebas la adición conjunta de zinc y boro foliar produjeron un incremento en el rendimiento de azúcar/ha del 67% comparado con el testigo, indicando los resultados que la aplicación foliar de estos micronutrimentos es efectiva en la corrección de la deficiencia de los mismos.

9. EVALUACIÓN DE RESIDUOS DE COSECHA

Tal y como se mencionó al inicio de este documento, hoy en día la cosecha en verde ha tomado importancia por su efecto sobre el medio ambiente. A este respecto se ha iniciado un experimento para evaluar los efectos en las características químicas y biológicas de un

lote comercial cosechado bajo esa modalidad. La cantidad de residuos de cosecha determinados al día siguiente de la cosecha oscilan entre 26 y 32 ton ha^{-1} con un porcentaje de humedad que varía de 10 a 11%. Estas cantidades de residuos de cosecha presentaban inicialmente concentraciones de 82, 39, 192, 34, 65 y 38 kg ha^{-1} en base seca de N, P, K, S, Ca, y Mg, respectivamente. Cuatro meses después las concentraciones de los elementos en los residuos disminuyeron en un 50%, con excepción del potasio cuya concentración disminuyó alrededor del 85%. En el suelo y como resultado de la presencia de los residuos, solamente el potasio aumentó su concentración en algunas repeticiones en más del 50%. Este experimento se continuará y sus resultados serán publicados oportunamente.

10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alexander A.G. 1973. Sugarcane physiology. Elsevier, Amsterdam.

Allen R.J., Jr., G. Kidder and G.J. Gascho. 1978. Predicting tons of sugarcane per acre using solar radiation, temperature and percent plant cane, 1971 through 1976. Proc. Am. Soc. Sugar Cane Technol. 7:18-22.

Anderson D.L. y Bowen J.E. 1990. Sugar-cane nutrition. Potash and Phosphate Institute. 39 p.

Ayers A. 1936. Factors influencing the mineral composition of sugarcane. Rep. Assoc. Hawaii. Sugar Technol. 15:29-41.

Barnes A.C. 1974. The sugarcane. Wiley, New York.

Bowen C.E. 1975. Micronutrient composition of sugarcane sheaths as affected by age. Trop. Agric. 52:131-137.

Bresler E., B.L. McNeal and D.L. Carter. 1982. Saline and sodic soils. Springer-Verlag, Berlin.

Clements H.F. 1980. Sugarcane Crop Logging and Crop Control: Principles and Practice. University of Hawaii Press, Honolulu.

Clowes M. St. J. and N.G. Inman-Bamber. 1980. Effects of moisture regime, amount of nitrogen applied and variety of the ripening response of sugarcane to glyphosates. Proc. S. Afr. Sugar Technol. Assoc. 54:127-133.

Coale F.J., C.A. Sánchez, F.T. Jzuno and A.B. Bottcher. 1993. Nutrient accumulation and removal by sugarcane grown on Everglades Histosols. Agron. J. 85:310-315.

Elawad S.H., G.J. Gascho and J.J. Street. 1982a. Response of sugarcane to silicate source and rate. I. Growth and yield. Agron. J. 74:481-484.

Elawad S.H., J.J. Street and G.J. Gascho. 1982b. Response of sugarcane to silicate source and rate. II. Leaf frickling and nutrient content. Agron. J. 74:484-487.

Gascho G.J. and S.F. Shih. 1982. Sugarcane. pp. 445-479. *In:* I.D. Teare and M.M. Peet (eds.). Crop-water relations. Wiley, New York.

Gascho G.J., D.L. Anderson and J.E. Bowen. 1993. Sugarcane. pp. 37-42. *In:* W. F. Bennett (ed.). Nutrient deficiencies and toxicities in crop plants. Amer. Phytopath. Soc., St. Paul, Minnesota.

Gosnell J.M. and A.C. Long. 1971. Some factors affecting foliar analysis of sugarcane. Proc. S. Afr. Sugar Technol. Assoc. 45:1-16.

Hartt C.E. 1972. Translocation of carbon-14 in sugarcane plants supplied with or deprived of phosphorus. Plant Physiol. 49:69-71.

Jones C.A. 1980. A review of evapotranspiration studies in irrigated sugarcane in Hawaii. Hawaiian Planters' Record 59:195-214.

Jones C.A. 1985. C4 grasses and cereals. Growth, development and stress response. Wiley, New York.

Kingston G. 1977. The influence of accessibility on moisture extraction by sugar cane. Proc. Int. Soc. Sugar Cane Technol. 16:1239-1250.

Koehler P.H., P.H. Moore, C.A. Jones, A. Dela Cruz, and A. Maretzki. 1982. Response of drip-irrigated sugarcane to drought stress. Agron. J. 74:906-911.

Maas E.V. and G.J. Hoffman. 1977. Crop salt tolerance: Current assessment. J. Irrig. Drainage Div. Am. Soc. Civil Eng. 103:115-134.

Martin-Prével P., Gagnard J. y Gautier P. 1983. L'analyse vegetale dans le contrôle de l'alimentation des plants. Technique et documentation. Paris. pág. 9.

Mitchell D.J., Thorburn P.J. and Larsen P. 2000. Quantifying the loss of nutrients from the immediate area when sugarcane residues are burnt. *In:* Proc. Aust. Soc. Sugar Cane Technol. 22:206-211.

Paz-Vergara J.E., A. Vásquez, W. Iglesias and J.C. Sevilla. 1980. Root development of the sugarcane cultivars H32-8560 and H57-5174, under normal conditions of cultivation and irrigation in the Chicama Valley. Proc. Int. Soc. Sugar Cane Technol. 17:534-540.

Pereira J.R., C.M.B. Faria and L.B. Margado. 1995. Effect of phosphorus application and of its residue on the yield of sugarcane in a Vertisol. Pesq. Agropec. Bras., Brasilia 30:43-48.

Reuter D.J. 1986. Temperate and subtropical crops, pp. 38-99. *In:* D.J. Reuter and J.B. Robinson (eds.). Plant analysis: an interpretation manual. Inkata Press, Melbourne.

Salazar J.D. y Rodríguez J.M. 1999. Respuesta de la caña de azúcar a la aplicación de tres dosis de carbonato y silicato de calcio, promedio de cuatro cosechas, San Carlos. *In:* Memoria 13^{avo} Congreso de ATACORI. San José, Costa Rica. p. 86-87.

Scandaliaris J., Pérez F., Rufino M. y Romero E. 2000. La cosecha en verde como estrategia para disminuir el impacto ambiental de la caña de azúcar. *In:* Memorias 5to Congreso de ATALAC, 13^{avo} Congreso de ATACA, 14^{avo} Congreso de ATACORI. San José, Costa Rica. p. 165-166.

MANEJO DE LOS SUELOS Y FERTILIZACION EN PALMA ACEITERA

Norberto Durán

1. SISTEMAS DE MANEJO

Las formas más antiguas de producción agrícolas son la esquilmación y el aprovechamiento de los nutrimentos almacenados en el suelo. El concepto mas moderno habla de enriquecimiento. Los dos primeros sistemas tienen en común que no utilizan ningún tipo de fertilizantes inorgánicos, mientras el tercero se basa en el enriquecimiento de los suelos con nutrimentos.

En el caso de la palma aceitera el manejo se dirige, en primer lugar a los nutrimentos que, como factores mínimos, limitan la producción. El principio de este sistema incluye la restitución de los elementos que existen en cantidades suficientes, extracción de aquellos nutrientes que naturalmente son abundantes y el enriquecimiento de aquellos elementos que resultan escasos.

Después de enriquecer el suelo se pasa a una fase de restitución permanente, la cual mantiene una situación de equilibrio entre las extracciones y las aportaciones. Para llegar a un sistema de enriquecimiento es necesario conocer la química del suelo. Esto se refiere a los niveles de los diferentes nutrimentos en el suelo su disponibilidad y la respuesta de la palma bajo los diferentes niveles para poder establecer un programa de fertilización.

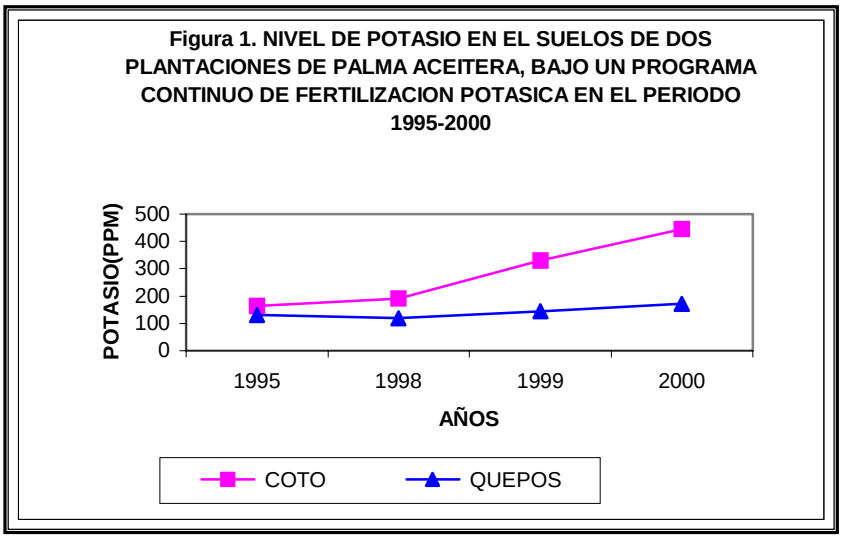
2. QUÍMICA DEL SUELO

La química de suelos es la parte de la ciencia del suelo concerniente a la constitución química, a las propiedades y a las reacciones químicas de los suelos. Si se conocen estos tres aspectos (constitución química, sus propiedades y las reacciones) es posible resolver problemas relacionados con la fertilidad y la nutrición.

El suelo está compuesto en su fase sólida por substancias inorgánicas y orgánicas. Las substancias inorgánicas incluyen minerales secundarios (óxidos y silicatos laminares) como la Vermiculita, Montmorillonita y Caolinita.

En los suelos bajo plantaciones de palma aceitera el tipo de arcilla predominante es la Vermiculita. En las plantaciones de Quepos (pacifico central) se cuantifico un 25 a 60% de vermiculita y en el Pacifico Sur entre 15 a 40 % (Ortiz y Collins,1992). Estas diferencias en la composición mineralógica de las zonas de Quepos y Coto podrían explicar en parte las diferencias en el efecto de los fertilizantes en los niveles de potasio del suelo en ambas zonas.

Desde el años 1997 en ambas plantaciones se inició la fertilización potásica con una dosis general de 170 kg ha^{-1}. Hasta la fecha, después de tres años de fertilización, se observa que en la zona sur, en donde la proporción de vermiculita es menor, los niveles de potasio aumentaron 280 ppm mientras en Quepos no se observan cambios significativos (figura.1).



Estos resultados concuerdan en parte con los obtenidos por Martínez (1994) en los que determinó que el 88,9% de las muestras del Pacifico Central fijaron potasio en húmedo mientras que la zona Sur solamente el 20%. Por lo tanto, el programa de enriquecimiento en los suelos de Quepos requerirá mas tiempo que los suelos de las plantaciones de Coto.

3. ENRIQUECIMIENTO Y RESTITUCIÓN

Como se indicó anteriormente el tiempo necesario para enriquecer un suelo depende del nivel de partida, nivel deseado, de las dosis utilizadas y de las características mineralógicas del suelo.

En el caso de los suelos de las plantaciones de palma de la zona sur, se determinó que con una dosis de potasio de 150, 300 y 450 kg ha^{-1} $año^{-1}$, en un periodo de cuatro años, es factible incrementar los niveles de potasio en el suelo en 131, 364 y 517 ppm respectivamente (figura2). En este mismo caso el tiempo y la dosis explicaron el 65% de la variación de los niveles de Potasio del suelo. Estos datos son de gran utilidad práctica ya que permite definir con cual dosis y en cuanto tiempo puede alcanzarse un nivel critico (defino previamente) de potasio en el suelo.

Otro aspecto de importancia a considerar en la interpretación de los análisis es la variación estacional de los niveles de potasio en el suelo. En la figura 2 se observa que con dosis cero, en el año dos, al igual que los demás tratamientos el nivel de potasio incremento y que la magnitud de cambio fue mayor conforme la dosis de K incremento. Peterson y Krueger (1980) han obtenido resultados similares e indican que el grado de las variaciones incrementan con el aumento de las dosis de fósforo y potasio de la fertilización (figura 3).

Los silicatos sin estructura cristalina es otro grupo de silicatos importante. Recientemente se han incorporado aproximadamente 2500 hectáreas, de tierras con este tipo

de minerales, en el cultivo de palma aceitera. Este grupo de minerales se presenta en los suelos de origen volcánico (Hapludans) de Paso Canoas. Se caracteriza por poseer una alta capacidad de fijación de fósforo (hasta 98 %) y muy bajos niveles de bases como calcio, potasio y magnesio. Sin embargo, los niveles de fósforo en la hoja son altos a pesar de presentar, el suelo, una alta capacidad de fijación.

FIGURA 2. NIVEL REAL Y ESTIMADO DE POTASIO EN EL SUELO SEGUN AÑOS DE APLICACION Y DOSIS (Kg/ha) SUELOS PACIFICO SUR.

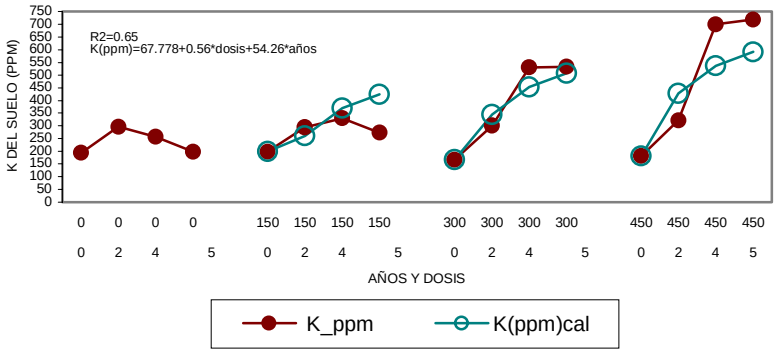
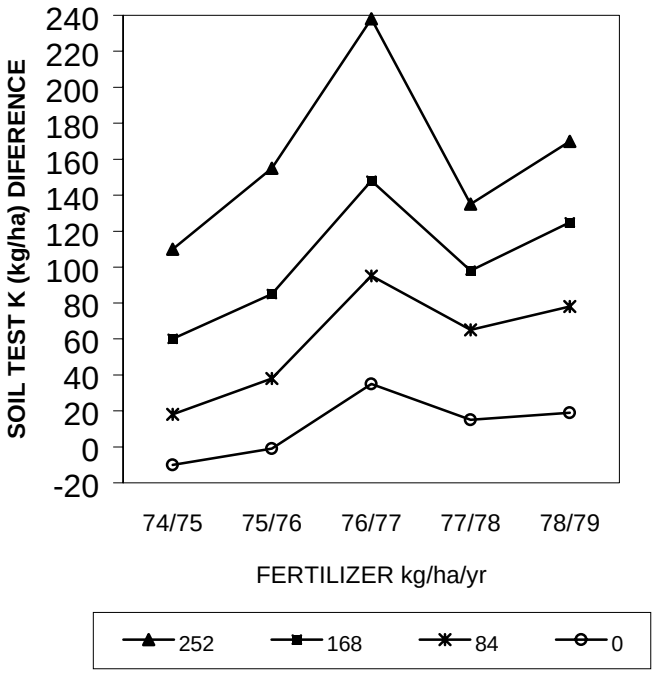
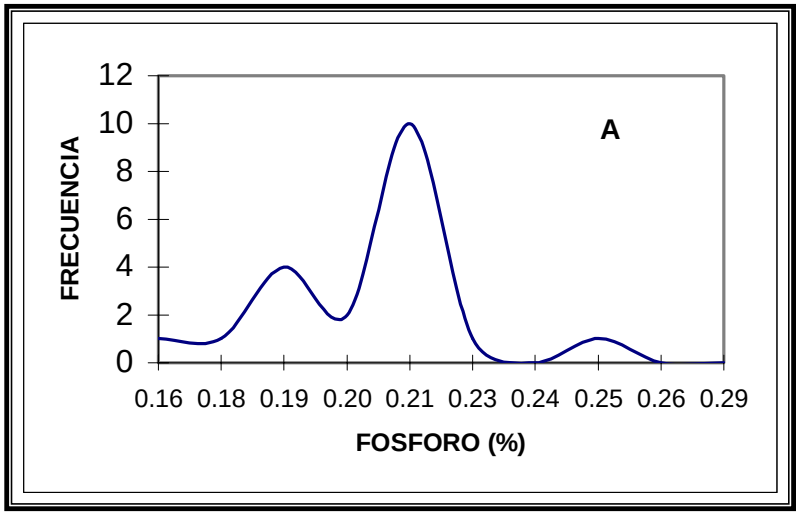


FIGURA 3. CHANGE IN SOIL TEST K FROM FALL TO FOLLOWING SPRING IN SOIL FROM FERTILIZED PLOTS (PETERSEN & KRUEGER, 1980)



Al comparar los niveles foliares de fósforo de palmas sembradas en estos Andisoles y en un Inceptisol se observa que los niveles altos (mayor a 0,16) son mas frecuentes en el Andisol. Se esperaría que sucediera lo contrario, sin embargo, por medio de fraccionamiento, aplicaciones localizadas de P y cal se ha aumentado la eficiencia del fertilizante (Figura 4). En el anexo 1 se muestra el diagrama del área de aplicación del fertilizante en el cultivo de palma.



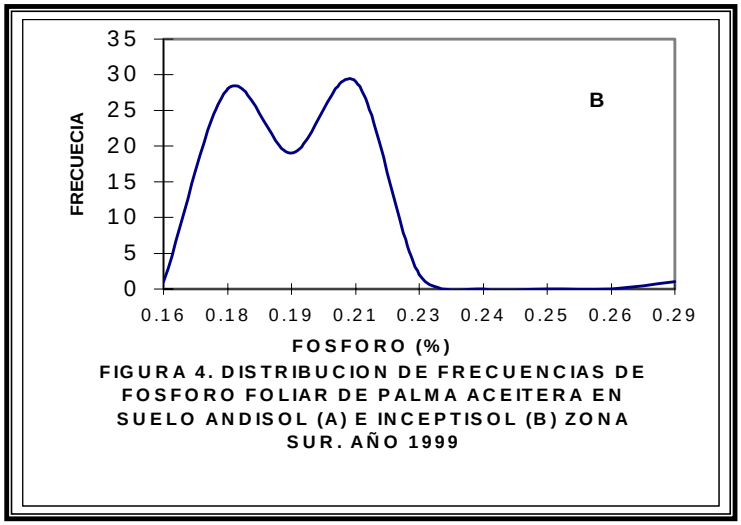


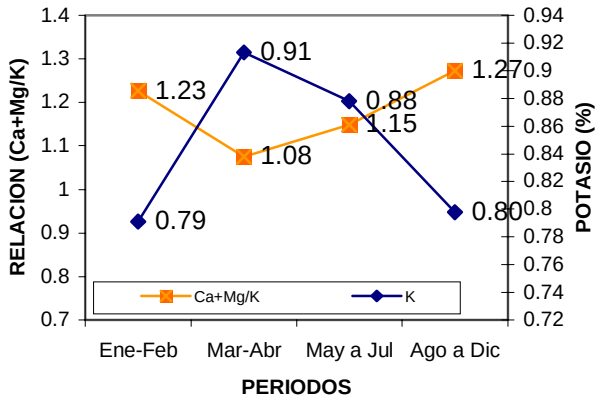
FIGURA 4. DISTRIBUCION DE FRECUENCIAS DE FOSFORO FOLIAR DE PALMA ACEITERA EN SUELO ANDISOL (A) E INCEPTISOL (B) ZONA SUR. AÑO 1999

4. RELACIÓN ENTRE ELEMENTOS EN EL SUELO Y FOLIAR

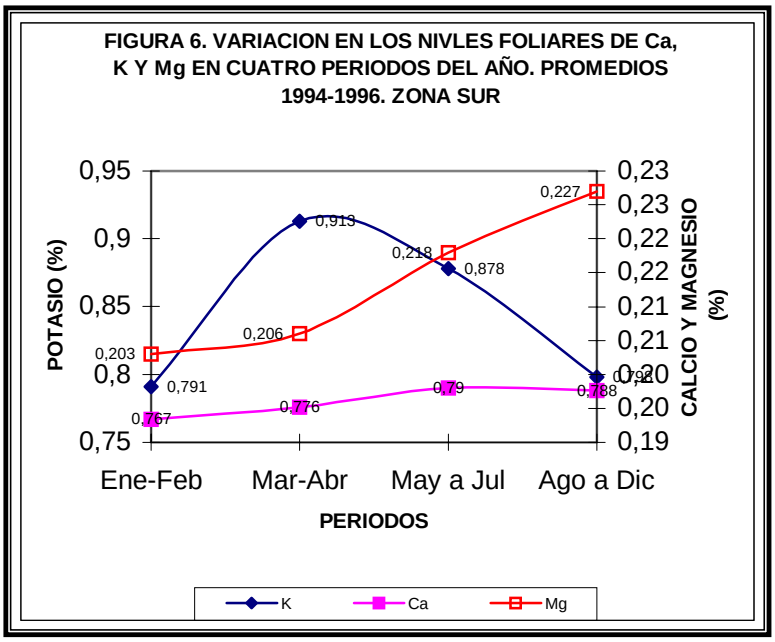
La disponibilidad de un nutrimento varía enormemente de un suelo a otro y es altamente dependiente de gran número de factores. Por lo que, en algunas circunstancias el nivel del elemento por si solo, no tiene valor para relacionarlo con la nutrición del cultivo. Uno de los factores identificados como importantes y que limitan fuertemente la absorción del potasio en palma es la relación Mg / K del suelo. En la zona de Quepos se determinó, con datos tomados de varios lotes de cosecha de un periodo de cuatro años, que conforme la relación se incrementaba los niveles de K foliar decrecían al igual que la producción el R2 fue de 0,33 y 0,30 respectivamente. La relación antagónica entre estos dos elementos ha sido documentada por varios autores. Hartley (1983) indica que la variación total de la composición de la hoja se explicaba en un 80% por el antagonismo entre K, Mg y Ca.

Prevot y Ollagnier (1954) determinaron que la deficiencia de K se debe expresar por el nivel de K foliar y los niveles de Ca y Mg. Green (1976) identificó el efecto antagónico entre Mg - K y muestra como aplicaciones de Mg pueden deprimir el nivel foliar K y viceversa. En las plantaciones de la Zona Sur se han obtenido resultados similares, cuando Ca+Mg/K foliar es baja (marzo-julio) el nivel de K foliar alcanza su nivel mas altos (fig. 5).

FIGURA 5. PROMEDIO DE POTASIO FOLIAR Y LA RELCION Ca+Mg/K PERIODO 1994-1996 ZONA SUR.



La palma aceitera muestra una variación estacional de los nutrimentos en el follaje asociado con cambios en las condiciones ambientales (aeración del suelo, precipitación, radiación solar etc.), la relación entre elementos y las fluctuaciones en los rendimientos. En la zona Sur se ha evaluado la variación de nutrientes y se determinó que la fertilización nitrogenada no tuvo efecto en la variación de otros nutrientes. Sin embargo, se identificó que el potasio varía inversamente con respecto al calcio y magnesio (figura 6). La curva de nitrógeno no mostró variaciones asociadas al fertilizante, pero se observó una tendencia a que la magnitud de cambio fuera mayor en las palmas fertilizadas con nitrógeno.



Relación entre nivel de K en suelos y producción.

Anteriormente se indicó que el nivel de potasio estaba influenciado por los factores mineralógicos del suelo y que las interacciones entre bases afectaban la absorción de K por las plantas. Bajo las condiciones de las plantaciones de Coto (zona Sur) las tendencias indican que con niveles de K en el suelo entre 200 y 300 PPM se obtienen las máximas producciones. Niveles superiores no muestran incrementos significativos en producción.

5. LEVANTAMIENTO DE SUELOS

Para conocer las características y propiedades de los suelos y determinar su aptitud para cualquier cultivo, es necesario realizar un "levantamientos edafológicos". Estos permiten entender el origen de los suelos, conocer sus propiedades, su distribución geográfica y predecir su comportamiento bajo diferentes sistemas de manejo.

La interpretación o predicción del comportamiento de los suelos representa la parte práctica del levantamiento. A partir del análisis cuidadoso de las características y propiedades de los suelos, cada una de las unidades de mapeo o de las unidades taxonómicas, se clasifican desde el punto de vista de sus limitantes para los usos a considerar. Adicionalmente, es posible también, hacer predicciones sobre su comportamiento para todos aquellos usos relacionados con el suelo, o para hacer predicciones sobre prácticas de manejo (fertilización), o de adecuación (drenajes).

Anteriormente se hablo sobro la fertilidad de los suelos y los fertilizantes, sin embargo, la física del suelo juega un papel muy importante en la nutrición de la palma aceitera. En modelos de producción se ha determinado que el mal drenaje puede explicar

hasta el 80 % de la variación en producción (Durán y Ortiz 1994). Asociado con la baja aeración se incluyen factores de cómo la compactación o sellamiento de la superficie del suelo, nivel freático, la topografía, la textura, número, tamaño y forma de los poros, mineralogía del suelo y el clima. Este último factor, se ha demostrado que explica hasta el 75% de la variación de la producción (en la zona sur) y que altas precipitaciones se asocian con caídas en rendimiento 18 meses después (Castro, 1999).

Considerando estos resultados se esta desarrollando un sistema de evaluación de tierras basado en las propiedades físicas del suelo identificadas como importantes para el desarrollo del cultivo (cuadro1).

6. RELACIÓN ENTRE CONDICIONES FÍSICAS DE SUELOS Y ENFERMEDADES DE LA PALMA ACEITERA.

Uno de los factores mayormente asociados a pudriciones de puntos de crecimiento (cogollo) es la pobre aeración de los suelos. Como se menciono, esta condición es causada por altos niveles freáticos, texturas arcillosas, compactación, texturas contrastantes en el perfil y estructuras débilmente desarrolladas.

En un estudio realizado en la plantación de Coto (zona sur) en un complejo de suelos, clasificados como Fluvaquentic Eutropepts y Aeric Tropaquepts, se determinó que las palmas se enfermaban de pudrición de flecha, cuando en el suelos se presentaba un horizonte gleyzado dentro de los primeros 85 cm de profundidad en el perfil (figura7). Igualmente se ha dado seguimiento a la relación entre la succión de agua del suelo y se determinó que conforme la succión decrece la incidencia de trastornos fisiológicos incrementa (Chinchilla y Durán, 1999; Chinchilla y Durán, 1998).

Efecto de la labranza sobre las propiedades físicas de los suelos

Una forma de disminuir el efecto negativo de la compactación, es por medio de las prácticas de labranza. Una de las prácticas recomendadas, en palma, es labranza profunda. Para esto se utiliza un subsolador, el cual rompe el subsuelo (compactado), en terrones. El subsoleo más una pasada de rastra permite romper los terrones grandes en fragmentos pequeños, con lo cual se aumenta el volumen de suelo y disminuye la resistencia a la penetración. Es importante recordar que con una práctica de labranza no se recupera la estructura original del suelo. Por lo tanto, un manejo cuidadoso del transito de maquinaria, dentro de la plantación, junto con un programa de incorporación de materia orgánica y coberturas (leguminosas) serán los factores que al final indique la posibilidad de éxito o fracaso, en la meta por mejora de la estructura (aeración) del suelo.

Influencia del subsoleo sobre la velocidad de infiltración del agua en los suelos

La velocidad de infiltración es un importante parámetro que se utiliza para cuantificar la facilidad de entrada del agua en el suelo a través de la superficie. Esto es sumamente importante porque una alta velocidad de infiltración favorece el drenaje del suelo. Esta condición es deseable para áreas de alta precipitación como es el caso de Coto (zona Sur).

CUADRO 1. CUALIDADES FISICAS DE SUELOS IMPORTANTES EN PALMA ACEITERA Y UNA PROPUESTA DE CLASIFICACION DE TIERRAS PARA PALMA

Factores	Profundidad	CLASES DE TIERRA POR CAPACIDAD DE USO			
		I	II	III	IV
Textura	0-30	Fa(fino-muy fino)-F-FA-FAa	Fa(medio)-FL-FA-FAL-'FAa	AL-Aa-A-Fa(grueso)	AL-Aa-A-Fa
	30-60	Fa(fino-muy fino)-F-FA-FAa	Fa(medio)-FL-FA-FAL-'FAa	AL-Aa-A-Fa(grueso)	aF-A-AL-Esqueletal
	60-90	Fa(fino-muy fino)-F-FA-FAa	Fa(medio)-FL-FA-FAL-'FAa	aF-A-AL-Esqueletal	Fa-F-FL-FA-FAL-'Faa-AL-Aa-A
	90-120	Fa(fino-muy fino)-F-FA-FAa	aF-A-AL-Esqueletal	Fa-F-FL-FA-FAL-'Faa-AL-Aa-A	Fa-F-FL-FA-FAL-'Faa-AL-Aa-A
Estructura	0-30	bloques subangulares muy finos a medios migajosa o granular fino a gruesa,	bloques subangulares y angulres medios granular gruesa	bloques angulares y subangulares gruesos	bloques subangulares y angulares muy gruesos o sin estructura
	30-60	bloques subangulares muy finos a medios migajosa o granular fino a gruesa,	bloques subangulares y angulres medios granular gruesa	bloques angulares y subangulares gruesos	bloques subangulares y angulares muy gruesos o sin estructura
	60-90	bloques subangulares muy finos a medios migajosa o granular fino a gruesa,	bloques subangulares y angulres medios granular gruesa	bloques subangulares y angulares gruesos, muy gruesos o sin estructura	bloques subangulares y angulares muy gruesos o sin estructura
	90-120	bloques subangulares muy finos a medios migajosa o granular fino a gruesa,	sin estructura	bloques subangulares y angulares gruesos, muy gruesos o sin estructura	bloques subangulares y angulares muy gruesos o sin estructura
Profundidad efectiva		+1.5	1.5-1.0	1-0.5	-0.5
Permeabilidad Coductividad hidraulica (cm/h) hidraulica.	0-30	modera 2-6.25 buena permeabilidad puede permitir buena relacion agua/O2	moderamente rapida 6.25-12.5 buena permeabilidad puede permitir buena relacion agua/O2	moderadamente lenta (0.5-2) o rapida +12.5 no permite una buena relación H2O/O2 o muy baja retención de agua.	muy lenta o rapida <0.5 muy lenta para poder mejorar el drenaje natural o muy rapida para suplir, de forma natural, agua al cultivo
	30-60	modera	moderamente rapida	moderadamente lenta (0.5-2) o rapida +12.5	muy rapida (+25.4)
	60-90	modera	moderamente rapida	muy lenta o muy rapida (+25.4)	cualquiera
	90-120	modera	moderamente lenta a lenta o rapida	cualquiera	cualquiera
Pendiente (%)		0-8	8-12	12-20	>20
Rocosidad		ligeramente rocoso (2%)	rocoso (3-10%)	rocoso (3-10%)	muy rocoso (+10%)
Drenaje natural		bueno	moderado	imperfecto	pobre o excesivo
Inundaciones		sin peligro	ocasional (cada 5 años)	frecuente(cada 2 años)	muy frecuente(cada año)

Las texturas arenosas, areno francosas y franco arenosas no presentan extructura o es muy debil, sin embargo, muestran alta conductividad hidraulica debido a los poros texturales.

horizontes o capas con una valor de conductividad hidraulica cinco veces menor que la conductividad del horizonte superior se denominan impermeables.

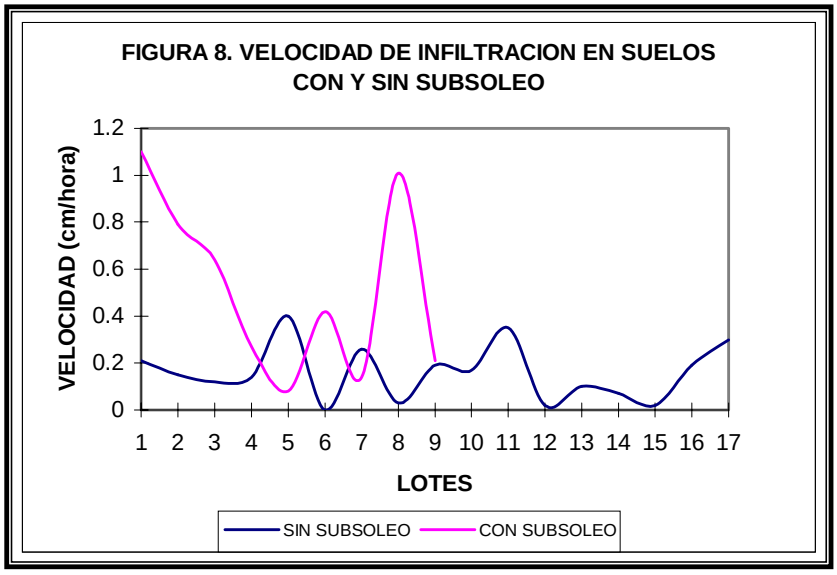
Arcillas de tipo 1:1 se permiten en la clase I y II siempre y cuando no presenten deterioro de las propiedades físicas.

Fuente: Norberto Durán trabajo en proceso de publicación.

En el cuadro 2 se muestran los resultados de velocidad de infiltración en 20 lotes selectos de diferentes tipos de suelo de la División de Coto, los datos se separaron en lotes con y sin subsolado. Para facilitar la interpretación de estos datos se numeraron de 1 a 17 y se graficaron en la figura 8.

Cuadro 2. Velocidad de infiltración del agua en el suelo en diferentes lotes de la plantación de Coto, Costa Rica

Número de observación	Lote	Velocidad de infiltración sin subsoleo ($cm\ h^{-1}$)	Lote	Velocidad de infiltración con subsoleo ($cm\ h^{-1}$)
1	14	0,21	1	1,10
2	104	0,15	24	0,79
3	108	0,12	22	0,64
4	97	0,14	43	0,27
5	110	0,40	68	0,08
6	107	0,00	69	0,42
7	89	0,26	71	0,14
8	84	0,03	45	1,01
9	8	0,19	49	0,21
10	22	0,17	-	-
11	42	0,35	-	-
12	73	0,02	-	-
13	118	0,10	-	-
14	114	0,07	-	-
15	68	0,02	-	-
16	71	0,19	-	-
17	45	0,30	-	-
Promedios	**-**	**0,15**	**-**	**0,52**



El promedio de la velocidad de infiltración,de los lotes subsolados, fue de 0.52 cm hr^{-1} y en los suelos no subsolados fue de 0.15 cm $hr^{-1.}$ Unicamente el 7.7% de los suelos subsolados mostraron velocidades de infiltración inferiores al promedio de los suelos sin subsolar. Inclusive en dos de los lotes subsolados, la velocidad de infiltración fue tan alta que no se pudo medir. La mayor velocidad de infiltración en los suelos subsolados se debió a que el subsoleo rompió las capas compactas, de suelo, que restringían el movimiento del agua y la penetración de raíces. Así, el subsoleo efectuado en estas áreas permitió mejorar la velocidad de infiltración y por lo tanto el drenaje y la aeración de los suelos en estos lotes.

7. BIBLIOGRAFÍA

Castro R. 1999. Efecto de la precipitación en la producción. Estudio de casos finca 42, zona sur. Avance de investigación. Compañía Palma Tica. Costa Rica.

Chinchilla C. Y Durán N. 1998. Management of phytosanitary problems in oil palm: An agronomic perspective. Palmas, Colombia. 19 (número especial):242-256

Durán N. 2000. Una propuesta de clasificación de tierras para palma aceitera. Avances de investigación. Compañía Palma Tica. Costa Rica.

Durán N. 2000. Dosis de potasio y su efecto en los niveles del suelo y en producción. Avances de investigación. Compañía Palma Tica. Costa Rica.

Durán N. 1995. Influcencia del subsoleo sobre la velocidad de infiltracion. Avance de investigacion. Compañía Palma Tica. Costa Rica.

Durán N. Y Chinchilla C. 1997. Uso de datos históricos (producción y análisis químicos) para estimar las necesidades de fertilización en el corto plazo en palma aceitera. INPOPHOS, ANCUPA, Ecuador.

Durán N. Y Ortiz R. 1995. Efecto de algunas propiedades físicas del suelo y la precipitación sobre la producción de la palma aceitera (*E. guineensis*) en Centro América. Agronomía Mesoamericana 6:1 188.

Durán N., Salas R. Y Chinchilla C. 1999. Manejo de la nutrición y fertilización en palma aceitera en Costa Rica. XI Congreso Nacional Agronómico y Recursos Naturales, III Congreso Nacional de Suelos, San José, Costa Rica.

Elbersen G., Benavides S. Y Botero P. 1986. Metodología para levantamientos edafológicos. Segunda parte; especificaciones y manual de procedimientos 2da. Ed. Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Colombia.

Green A.H. 1976. Field experiments as a Guide to fertilizer practice. Chapter 16, p. 235-261. Inc: R.H.V. CORLEY, J.J. HARDON and B.J. WOODS (eds.) oil palm. Research. Elsevier scientific publ. Co. Amsterdam.

Hartley C. 1988. The oil palm 3rd ed. Longman Group UK. 761 p.

Martínez C. 1994. Estudio de fijación de potasio en suelos cultivados con palma aceitera en la zona del Pacífico Central y Sur de Costa Rica. Tesis Ing. Agr. San José, Costa Rica. Universidad de Costa Rica. Facultad de Agronomía. 64 p.

Ortiz R., Collins M. 1992. Clay mineralogy of alluvial soil from the pacific coast of Costa Rica. Advances in agronomy dept. Annual report. Palm Research Program, Palma Tica. 4 p.

Peralta F., Vásquez O., Richardson D., Alvarado A. Y Bornemisza E. 1985. Effect of some physical characteristics on yield, growth and nutrition, of the oil Palm In Costa Rica Oleagineux. 40 (8-9)423-428.

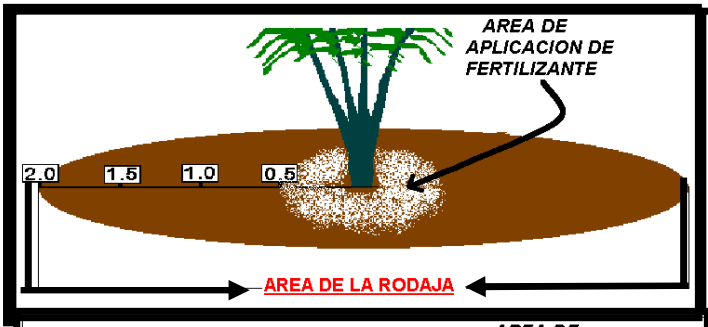
Prevot P. And Ollagnier M. 1954. Peanut and oil palm foliar diagnosis interrelation of N, P, K, Ca and Mg. Pl physiol. 29p.

Usdi. 1993. Bureau of reclamation drainage manual. U.S.A.

Peterson L.A. and A.R. krueger. 1980. Variation in content of available P and K in soil samples from a cropped N, P and fertility experiment over 8 years. Commun soil Sci plantanal. 11:993-1004.

ANEXO UNO

ÁREA DE APLICACION DEL FERTILIZANTE

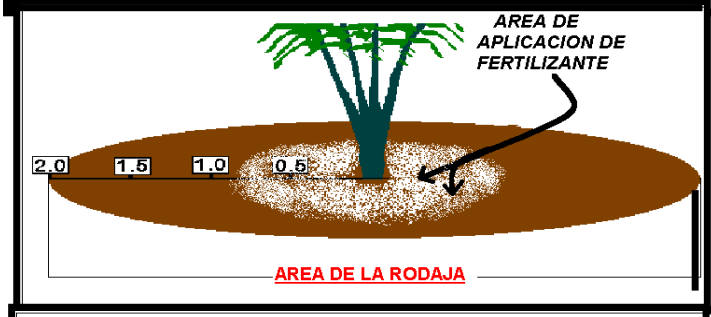


PALMAS DEL PRIMER AÑO DE SIEMBRA

Fertilizante distribuido la dosis entre 30 y 40 cm del tronco de la palma.

PROHIBIDO:

Dejar el fertilizante acordonado y/o en pelotas.

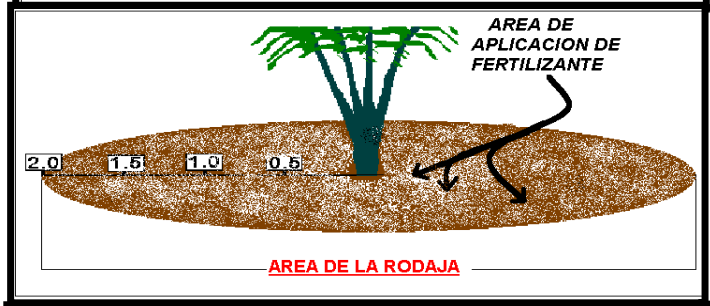


PALMAS DEL SEGUNDO AÑO SIEMBRA

Fertilizante distribuido a unos 80 cm del tronco de la palma.

PROHIBIDO:

Dejar el fertilizante acordonado y/o en pelotas.



PALMAS DEL TERCER AÑO SIEMBRA

Fertilizante distribuido en todo el diámetro de la rodaja.

PROHIBIDO:

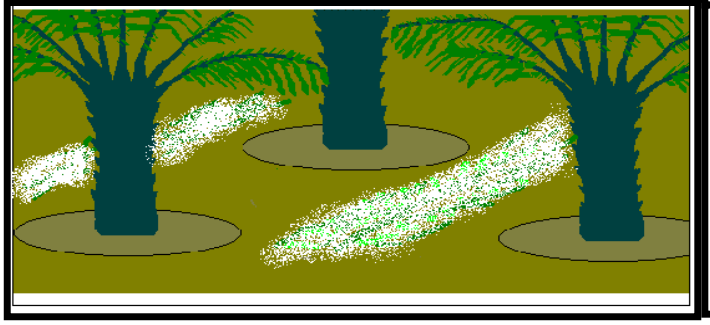
Dejar el fertilizante acordonado y/o en pelotas.

PALMAS DEL CUARTO AL SEXTO AÑO DE SIEMBRA

Fertilizante distribuido entre un 50 % en la Rodaja y el otro 50 % en el Arrume.

PROHIBIDO:

Dejar el fertilizante acordonado y/o en pelotas.



PALMAS DE MAS DE 7 AÑOS SIEMBRA

Fertilizante distribuido en el 100% del arrúmen.

PROHIBIDO:

Dejar el fertilizante acordonado y/o en pelotas.

MANEJO DE SUELOS Y FERTILIZACIÓN DEL CULTIVO DEL BANANO

Carlos L. Flores S.

1. INTRODUCCIÓN

El banano es un importante cultivo alimenticio para el hombre, especialmente en los trópicos. Anualmente se producen alrededor de 50 millomes de toneladas de banano pero la mayoría se consume localmente. Cerca del 80% de la exportación mundial de banano proviene de la América tropical (Centro, sur y caribe). En términos de mercado mundial el fruto del banano ocupa el segundo lugar desplazado solamente por las uvas. El banano se produce en regiones tropicales y subtropicales donde está disponible para el consumidor durante todo el año.

Costa Rica es el segundo país exportador de banano en el mundo, con más de 100 millones de cajas por año (CORBANA, 1995). La actividad bananera ha contribuido al desarrollo socioeconómico del país por ser una fuente de empleo y por la captación de ingresos fiscales y divisas. En Costa Rica existen actualmente más de 45 000 hectáreas, de las cuales más del 98% se ubica en el caribe y menos del 2% en el pacífico sur (CORBANA, 1995).

2. SUELOS APTOS PARA EL CULTIVO DEL BANANO

El cultivo del banano se siembra con éxito en un amplio rango de suelos de las regiones tropicales y subtropicales del mundo. Los clones comerciales Valery y Gran enano base del comercio mundial bananero al ser muy exigentes en suelos generalmente y para poder obtener altos rendimientos (50-60 ton/ha/año de fruta de alta calidad) solo se deben sembrar en las mejores condiciones físicas y químicas de suelos. Estos suelos deben ser francos o ligeramente franco arcillosos, bien drenados, profundos y fértiles. Los rendimientos pueden deprimirse en suelos muy arcillosos o de poca profundidad efectiva debido a la existencia de capas compactas o pedregosas a 30-60 cm de profundidad. El mal drenaje puede ser un problema en algunas de estas situaciones. Tablas de agua superficiales conllevan a un sistema radicular poco superficial, mientras que tablas de agua profundas permiten que las raíces profundicen a 150 cm o más.

La acidez de los suelos es otro de los factores que influyen negativamente en el desarrollo del sistema radicular de las plantas de banano. Aunque el banano crece en suelos con pHs extremos de 3.5 a 9.0 se sabe que el rango adecuado para la siembra de banano de alto rendimiento debe ser de 5.5 a 6.5. Pero más que el pH de los suelos se debe de dar mayor importancia a los valores de acidez intercambiable y a los porcentajes de saturación de acidez presentes en los suelos, ya que se sabe que las raíces del banano se ven seriamente afectados cuando existen niveles de acidez intercambiable mayores a 1.0 cmol(+)/L y cuando se tienen valores de saturación de acidez mayores al 20%.

Antes de iniciar una explotación comercial de banano, es necesario evaluar todos los parámetros que determinan la aptitud de las tierras para el cultivo del banano. La selección de tierras que reúnan condiciones adecuadas, asegura el óptimo desarrollo del cultivo, altas

producciones y rentabilidad. El éxito de una explotación bananera depende de la elección correcta del suelo. Para manejar eficientemente la fertilización del cultivo del banano, es necesario tener información de los suelos de cada zona donde se cultiva. El conocimiento de la dinámica de los nutrimentos en los suelos así como de sus relaciones permite planificar y realizar la fertilización de acuerdo con las necesidades del cultivo.

En Costa Rica el cultivo del banano para exportación se ubica en áreas con características de suelo, clima y topografía muy definidas, éstas se han dividido en tres zonas, denominadas Este, Oeste y Sur. Estos suelos se han formado por desbordamientos de ríos que han arrastrado materiales con propiedades químicas y físicas diferentes, lo que explica su diferente origen. Las dos primeras zonas se ubican en el Caribe, cuyo límite natural es el Río Reventazón y cada una de ellas debe su nombre a la ubicación con respecto al río (Lara, 1970; Jiménez, 1972).

Los suelos ubicados en la Zona al Oeste del Río Reventazón, por lo general son de textura gruesa, originados principalmente por el desbordamiento de los ríos Parismina, Guácimo, Cristina, Bosque, Santa Clara, Tortuguero, Guápiles, Toro Amarillo, Desenredo, Chirripó, Sucio y Puerto Viejo. El material parental de estos suelos se origina a partir de coladas de lava, de rocas piroclásticas o andesíticas, de lahares pequeños y rocas sedimentarias. Normalmente son de texturas que varían de franco a franco arenoso (López y Solís, 1992; López y Espinoza, 1995). Esta zona se encuentra dentro de las zonas de Vida Bosque Muy Húmedo tropical y Bosque Muy Húmedo Premontano (Tosi, 1969).

Por su material parental, los suelos de esta zona presentan una baja fertilidad. Presenta valores de pH promedio de 5.3, considerados como ligeramente ácidos, con una acidez extractable alta (1.19 cmol(+)/kg). Sin embargo en términos generales el porcentaje de saturación de acidez promedio es relativamente bajo (13.9%). En algunos casos se presentan áreas con altos niveles de saturación de acidez por lo que se hace necesario neutralizar dicha acidez mediante el uso de una enmienda como el carbonato de calcio, la cal dolomita o calyeso.

Cuadro 1. Características químicas de los suelos de las zonas bananeras de Costa Rica

Zona	Categoría	pH	Acidez Extrac.	Ca	Mg	K	P	Fe	Cu	Zn	Mn	MO
				cmol(+)/L				mg/L				%
	Promedio	5.33	1,19	5,6	1,61	0,45	15	180	7	1,0	25	5,10
Oeste	Mayor	6.22	6,60	16,0	6,40	1,44	69	813	18	5,0	103	11,80
	Menor	4.34	T	0,9	0,40	0,08	4	84	2	T	4	1,90
	Promedio	5.88	0,33	25,1	5,98	0,36	19	119	13	1,0	34	2,60
Este	Mayor	7.64	3,14	41,8	14,90	1,17	136	301	96	32,0	150	6,70
	Menor	4.56	T	15,4	1,90	0,09	4	32	2	T	4	0,20
	Promedio	5.66	0,83	32,7	5,60	0,94	19	97	114	2,0	16	2,50
Sur	Mayor	7.71	3,34	50,2	8,70	2,16	4	211	299	4,0	49	7,10
	Menor	4,82	T	18,8	1,50	0,28	5	29	6	1,0	4	1,30

Los valores promedios de calcio y magnesio son adecuados para el cultivo pero muy cercanos a valores bajos. Esto hace que en algunas áreas se presentan respuestas altas a la fertilización con estos nutrimentos. Los niveles de potasio promedio están dentro del rango óptimo para el cultivo.

Los contenidos promedio del fósforo son de 15 mg kg^{-1} lo cual se considera óptimo. Sin embargo en esta zona se presentan normalmente problemas de abastecimiento de este nutrimento debido a que por los altos niveles de aluminio mucho de este fósforo está fijado y poco disponible para las plantas de banano.

De los nutrimentos menores, el zinc presenta valores promedios muy bajos (1,1 mg kg^{-1}) lo que frecuentemente ocasiona serios problemas de formación de fruta lo que redunda en una merma en los rendimientos en el proceso de empaque de fruta. El hierro presenta valores altos (180 mg kg^{-1}) lo que en ciertas ocasiones y cuando se presentan problemas de drenaje superficial llegan a ser tóxicos para las raíces del cultivo.

El contenido promedio de materia orgánica es más alto en esta zona que en las otras dos zonas bananeras (5.12%). Las relaciones Ca/K, Mg/K y (Ca+Mg)/K son bajas, mientras que la relación 100K/(Ca+Mg+K) es alta, lo cual muestra un fuerte desbalance del Ca y del Mg debido a los altos contenidos de K.

Cuadro 2. Relación de equilibrio K-Ca-Mg en los suelos de las zonas bananeras de Costa Rica

Zona	Categoría	Suma de cationes	CICE	S.AL	Ca/Mg	Ca/K	Mg/K	Ca+Mg /K	100K Ca+Mg+K
			Cmol(+)/L	%					
Oeste	Promedio	7,67	8,86	13,43	3,48	12,47	3,58	16,04	5,87
	Mayor	23,84	30,44	21,68	2,50	11,11	4,44	15,56	6,04
	Menor	1,38	1,38	T	2,25	11,25	5,00	16,25	5,80
Este	Promedio	31,39	31,72	1,04	4,19	69,58	16,61	86,19	1,15
	Mayor	57,87	61,01	5,15	2,81	35,73	12,74	48,46	2,02
	Menor	17,39	17,39	T	8,11	171,11	21,11	192,22	0,52
Sur	Promedio	39,23	40,06	2,07	5,84	34,78	5,96	40,73	2,40
	Mayor	61,06	64,40	5,19	5,77	23,24	4,03	27,27	3,54
	Menor	20,58	20,58	T	12,53	67,14	5,36	72,50	1,36

Los suelos al Este del Río Reventazón se han formado por el desbordamiento de los ríos Reventazón, Pacuare, Madre de Dios, Barbilla, Matina, Chirripó, Banano, Bananito, Estrella y Sixaola. El material parental de estos suelos proviene del arrastre de partículas provenientes de depósitos marinos clásticos finos y calizas ricas en carbonatos de calcio, óxidos de calcio, potasio, sílice y normalmente son de texturas franco a franco arcillosas (Herrera y Mata, 1993). Debido al tipo de material parental estos suelos son de una alta fertilidad. Esta zona está ubicada dentro de las zonas de Vida Bosque Húmedo Tropical,

Bosque Muy Húmedo Tropical y Bosque muy Húmedo Premontano (Tosi, 1969). Esta zona presenta no presenta problemas de acidez, ya que los valores de pH son adecuados (5,9), la acidez intercambiable promedio (0,33cmo(+)/kg) y el porcentaje de saturación de acidez promedio son muy bajos (1,3%).

Los contenidos promedios de calcio y magnesio en estos suelos son altos. Los contenidos promedios de potasio a pesar de que son más bajos que los de la Zona Oeste se consideran adecuados para la buena nutrición del cultivo. El fósforo presenta contenidos promedios mayores a los de la Zona Oeste y se consideran como óptimos.

Esta zona presenta muy bajos contenidos promedios de zinc (1,0 mg kg^{-1}). Con estos niveles no se logra satisfacer la demanda de las plantas de banano lo cual hace que muy frecuentemente se presenten fuertes problemas de calidad de fruta. Por otro lado el hierro presenta contenidos promedios muy altos, los cuales eventualmente pueden llegar a provocar toxicidad para las raíces de las plantas. Los contenidos promedios de materia orgánica para estos suelos son de 2.8%.

Se presentan valores altos en las relaciones Ca/K, M/K, y (Ca+Mg)/K y valores bajos en la relación 100K/(Ca+Mg+K) lo cual significa que existe un fuerte desbalance del K como consecuencia de los altos niveles de Ca y Mg presentes en estos suelos.

Los suelos de la Zona Sur se originaron de materiales similares a los de la Zona Este por provenir de las mismas formaciones geológicas en la cordillera de Talamanca, por lo que también son de una alta fertilidad natural. Sin embargo, esta zona se caracteriza por presentar un periodo seco muy marcado que se extiende de diciembre a abril, por lo se requiere el uso de riego para la obtención de adecuadas producciones. El brillo solar de esta zona es mayor que el de las zonas bananeras ubicadas en el Caribe de Costa Rica, lo cual es un factor ventajoso en la obtención de mayores producciones.

Los ríos que han tenido mayor influencia en la formación de estos suelos son los ríos Parrita, Naranjo, División, Barú, Sierpe, Grande de Térraba, Esquinas y Coto. Debido al tipo de material parental estos suelos son de una alta fertilidad. Esta zona está ubicada dentro de las zonas de Vida Bosque Húmedo Tropical, Bosque Muy Húmedo Tropical y Bosque muy Húmedo Premontano (Tosi, 1969).

En esta zona no existen problemas de acidez ya que los valores promedio de pH son adecuados para el cultivo. Los valores promedio de acidez intercambiable son altos pero el porcentaje promedio de saturación de acidez es muy bajo.

Los niveles promedios de calcio, magnesio y potasio van de medios a altos. Sin embargo se presenta un fuerte desbalance del magnesio debido a los bajos valores de la relación Mg/K, muy similares a los determinados para la Zona Oeste. Los niveles promedios de fósforo, hierro y manganeso son adecuados para el cultivo. A pesar de que los niveles promedios de zinc son mayores a los determinados en los suelos del Caribe de Costa Rica, también se consideran bajos para una buena nutrición del cultivo.

Los contenidos promedios de cobre en esta zona son mucho más altos que en las otras zonas bananeras, debido a las aplicaciones masivas de funguicidas a base de cobre que se realizaron en el pasado para el combate de la Sigatoca Amarilla. Es posible que se presenten problemas de toxicidad debido a estos altos niveles de cobre, lo cual repercute en la productividad del cultivo.

3. NECESIDADES NUTRICIONALES

El banano es una planta de muy rápido crecimiento que requiere para su normal desarrollo de una buena cantidad de nutrimentos disponibles en el suelo, los cuales pueden ser aportados en parte por el mismo suelo y por los residuos de las cosechas tales como hojas, seudotallos, cormos, raíces, etc, (Lahav y Turner, 1983), y en parte por el aporte por el hombre vía fertilizantes químicos y abonos orgánicos.

En una plantación comercial promedio en Costa Rica se producen al menos 50 toneladas de racimos/ha/año, pudiendo tenerse plantaciones más productivas de hasta 70 toneladas de racimos ha^{-1} $año^{-1}$. Tomando en cuenta las altas concentraciones de nutrimentos en el racimo del banano, y estas altas producciones de fruta, las cantidades de nutrimentos exceden los 500, 180 y 20 kg^{-1} ha $año^{-1}$ de potasio, nitrógeno, y fósforo. Estas cantidades deben ser repuestas para mantener la productividad en un buen nivel. Por ello es necesario el uso de cantidades adecuadas de fertilizantes minerales y abonos orgánicos al año.

En general, bajo condiciones de buenos suelos en Costa Rica el orden de importancia de los nutrimentos en lo que se refiere al manejo de la fertilización, es el siguiente:

$$N > K > Mg > Ca > P > S > Zn > B$$

A pesar de que las necesidades de potasio por las plantas de banano son mayores que las del nitrógeno, es más importante y crítico el nitrógeno ya que los suelos no poseen buenas reservas de este nutrimento. Por otro lado, el nitrógeno es un nutrimento que se pierde fácilmente y no puede ser tomado por la planta. Esto tiene mucha importancia en las zonas bananeras de Costa Rica donde la precipitación muchas veces supera los 3500 mm $año^{-1}$. Para contrarrestar esta situación en Costa Rica se recomienda fraccionar al máximo el fertilizante.

Para la determinación de las cantidades de los nutrimentos a aplicar se han realizado diversas investigaciones en las zonas bananeras de Costa Rica. Así por ejemplo en una investigación sobre dosis crecientes de nitrógeno realizada en la Zona Oeste se encontró que la mayor productividad (2867 cajas ha^{-1} $año^{-1}$), se alcanzó con la dosis de 320 kg ha^{-1} $año^{-1}$ (Herrera, 1989).

En dos diferentes ensayos sobre dosis crecientes de potasio se logró determinar que con el uso de 750 kg ha^{-1} $año^{-1}$ de K_2O se obtuvieron las mayores productividades (66.4 ton ha^{-1} $año^{-1}$ y 2600 cajas ha^{-1} $año^{-1}$) (Garita, 1980; Arias, 1984).

En otra investigación se halló que con una dosis de 600 kg ha^{-1} $año^{-1}$ de K_2O se obtuvo la máxima productividad con 3000 cajas ha^{-1} $año^{-1}$ (Hernández, 1985).

El efecto combinado NPK evaluado en una investigación logró determinar que la máxima productividad se obtuvo con la dosis de 300, 300 y 600 kg ha^{-1} $año^{-1}$ de N, P_2O_5, y K_2O (Herrera, 1990; López, 1991). En este estudio se observó que con el incremento en las dosis de nitrógeno se produjo una disminución del pH del suelo, se aumentó la acidez intercambiable y los contenidos de de Mn soluble. Todos estos cambios son negativos para el cultivo.

El cultivo del banano no requiere de grandes cantidades de fósforo debido a que este es un nutrimento móvil dentro de la planta y es reutilizado por la planta. En algunos trabajos de investigación realizados en suelos de la Zona Oeste no se ha logrado determinar respuesta a la fertilización con fósforo.

Investigaciones sobre dosis crecientes de azufre encontró que con 200 kg ha^{-1} $año^{-1}$ de SO_4 se obtuvo la máxima productividad con 3616 cajas ha^{-1} $año^{-1}$. Diversas pruebas con dosis crecientes de calcio y magnesio llevados a cabo en la Zona Oeste han logrado determinar que dosis de 200 kg ha^{-1} $año^{-1}$ de MgO y 560 kg ha^{-1} $año^{-1}$ de CaO permiten una apropiada nutrición de la planta de banano. Con la información generada hasta ahora por todas estas investigaciones se recomiendan las siguientes dosis en kg ha^{-1} $año^{-1}$ de fertilizantes para las tres zonas bananeras de Costa Rica.

Cuadro 3. Recomendación de fertilización (kg ha^{-1} $año^{-1}$) para las zonas bananeras

Nutrimentos	Zona Este	Zona Oeste	Zona Sur
N	350-400	350-400	350-400
P_2O_5	0-50	50-100	0-50
K_2O	600-700	600-700	600-700
MgO	0-50	50-200	50-150
CaO	0	560	0
SO_4	200-300	200-300	200-300
Zn	0-12	0-12	0-12
B	0-4	0-4	0-4

Las dosis recomendadas en cada finca en particular están supeditadas a los resultados de un estudio de fertilidad de suelos y nutrición mineral. La eficiencia en el aprovechamiento del fertilizante está regulado por el lavado de nutrimentos. Este lavado está a su vez relacionado con la precipitación y la solubilidad de los fertilizantes utilizados. Existen reportes sobre pérdidas por lixiviación de 55% de nitrógeno y de 25% de potasio (Godefroy, 1975). El manejo de la fertilización en el cultivo del banano debe considerar esta eficiencia de absorción de nutrimentos. Las condiciones de alta precipitación en Costa Rica justifican el fraccionamiento de los fertilizantes (Flores, 1994). Entre mayor sea el número de ciclos de fertilizantes, mayor será el índice de aprovechamiento de los fertilizantes por parte del cultivo. En términos generales se recomienda utilizar al menos 10 ciclos de fertilización al año.

4. BIBLIOGRAFÍA

Arias, H. 1984. Respuesta del banano (Musa AAA), subgrupo Cavendish Gran Enano, a dosis crecientes de sulfato de potasio en un suelo Oxic Dystropets de Río Jiménez, provincia de Limón. Tesis Ing. Agr. Facultad de Agronomía, Universidad de Costa Rica 89p.

Flores, C. 1991. Respuesta del cultivo del banano (Musa AAA) subgrupo Cavendish Clon Valery, a la fertilización con sulfatos. In. Informe anual Corporación Bananera Nacional, S.A. San José Costa Rica p41-44.

Flores, C. 1991. Respuesta del cultivo del banano (Musa AAA) a diferentes formas de colocación del fertilizante. In Resúmenes de X ACORBAT, Tabasco, Méjico p. 59.

Flores, C. 1994. Pérdida de cationes y aniones en suelos bananeros de la Zona Atlántica de Costa Rica. In Resúmenes de XI ACORBAT, San José, Costa Rica

Garita, R. 1980. Respuesta del banano (cultivar Valery), a dosis crecientes de potasio en suelos de la zona de guápiles. Tesis Ing. Agr. Facultad de Agronomía, Universidad de Costa Rica 137p.

Godefroy, J. E. Roose, and M. Muller. 1975. Estimation des pertes par les eaux de ruisellement et de drainage des élements fertilizants dans un sol de bananeraie du sud de la Cóte d Ivory. Fruits 30(4) 223-235.

Hernández, M. 1985. Respuesta del banano clon Gran Enano, a la fertilización potásica en un suelo Typic Dystropets de Cariari, cantón de Pococí. Tesis Ing. Agr. Facultad de Agronomía, Universidad de Costa Rica.

Herrera, W. 1989. Respuesta del banano (Musa AAA) subgrupo Cavendish, Clon Gran Enano, a la fertilización con dosis crecientes de nitrógeno. In. Informe anual Corporación Bananera Nacional, S.A. San José Costa Rica p23-25.

Jiménez, T. 1972. Génesis, clasificación y capacidad de uso de algunos suelos de la Región Atlántica de Costa Rica. Tesis Ing. Agr. Facultad de Agronomía, Universidad de Costa Rica. 180p.

Lahav, E.; Turner, D.W. 1992. Fertilización del banano para rendimientos altos. Segunda edición. Boletín No 7 Instituto de la Potasa y el Fósforo. Quito Ecuador. 71p.

Lara, F. 1970. Problemas y Procedimientos bananeros en la Zona Atlántica de Costa Rica. Imprenta Hnos Trejos San José Costa Rica. 278p.

López, A. 1990. Respuesta del banano (Musa AAA) subgrupo Cavendish, Clon Gran Enano, a dos dosis de nitrógeno y fósforo y tres de potasio. In. Informe anual Corporación Bananera Nacional, S.A. San José Costa Rica p55-59.

López, A. 1990. Respuesta del banano (Musa AAA) subgrupo Cavendish, Clon Valery, a la fertilización cálcica y magnésica. In. Informe anual Corporación Bananera Nacional, S.A. San José Costa Rica p52-54.

López, A. 1991. Fertilización del cultivo del banano con diferentes dosis de nitrógeno, fósforo y potasio. In. Informe anual Corporación Bananera Nacional, S.A. San José Costa Rica p35-36.

López, A.; Solis, P. 1992. Contenidos e interacciones de los nutrimentos en tres zonas bananeras de Costa rica. CORBANA 15(36) 25-32.

Soto, M. 1992. Bananos, Cultivo y comercialización. Segunda edición, Imprenta Lil San José, Costa Rica 674p.