



Órgano de divulgación de la
Facultad de Agronomía
Universidad de San Carlos de Guatemala

Vol. XVIII, No. 2



Guatemala
1999

Facultad de Agronomía Universidad de San Carlos de Guatemala

Junta Directiva

Decano: Ing. Agr. Edgar Franco Rivera
Secretario: Ing. Agr. Edil Rodríguez
Vocal I: Ing. Agr. Walter García Tello
Vocal II: Ing. Agr. William Roberto Escobar López
Vocal III: Ing. Agr. Alejandro Hernández
Vocal IV: Br. Jacobo Bolvito
Vocal V: Br. José Domingo Mendoza

Comité Editorial

Dr. Hugo Cardona Castillo
Dr. Ariel Ortíz
Ing. Agr. Mario Alberto Méndez
Lic. David Pinto Díaz
Periodista Dennis Escobar Galicia

Edición y Artes Finales: F&G Editores
Telefax: (502) 4740214
fgeditor@guate.net
www.fygeditores.com

Impresión: Editorial Cholsamaj
Telefax: (502) 2325417
cholsamaj@micro.com.gt

Revista Tikalia
Facultad de Agronomía
Universidad de San Carlos de Guatemala
Ciudad Universitaria, zona 12
Guatemala, Guatemala
Teléfono: (502) 4769770
Fax: (502) 4769770
Correo electrónico: comited.agro@usac.edu.gt

PRESENTACIÓN

Hemos llegado al volumen XVIII, No. 2. ¡*Tikalía* ha cumplido la mayoría de edad en Guatemala!: 18 años. La Facultad de Agronomía cumplirá el próximo año cincuenta años de existencia. En este primer cincuentenario de la Educación Agrícola Superior en Guatemala, la Revista *Tikalía* ha contribuido al desarrollo de las ciencias agrícolas mediante la divulgación de artículos científicos y técnicos que reflejen resultados de investigaciones de estudiantes y profesores de la facultad, así como también estudios de profesionales agrícolas y de recursos naturales de otras instituciones. Esperamos que al conmemorar el Cincuentenario de fundación de la Facultad de Agronomía de la Universidad de San Carlos de Guatemala, las autoridades universitarias y los editores de la revista nos comprometamos a mejorar su calidad y distribución. No debe olvidarse que la divulgación científica es una misión impostergable de la Universidad y que *Tikalía* es el medio para difundir, nacional e internacionalmente, los aportes científico-tecnológicos en sistemas de producción agrícola y recursos naturales renovables.

Tikalía —en este número— incluye cinco artículos de estudios conducidos por profesores de la Facultad de Agronomía, dos de ellos en coautoría con investigadores de otras instituciones.

El primer artículo: "Efecto de la erosión del suelo sobre el costo de tratamiento de agua en la cuenca del río Corumbatai, Brasil"; se redactó con base en la tesis de Doctorado que Ariel Ortiz López presentó a la universidad de Sao Paulo, Brasil.

El artículo de Mamerto Reyes Hernández y Lesbia Calderón Aguirre determina la rentabilidad social de la vacunación bovina contra ántrax realizada después del Huracán Mitch. Los resultados reflejan la alta rentabilidad que esta acción de coyuntura

registró para la nación y apoyan su empleo para enfrentar contingencias futuras.

El estudio de Carlos Orozco Castillo nos muestra resultados que pueden ayudar en la identificación de las fuentes genéticas más apropiadas para su incorporación en los programas de mejoramiento de café. Él analizó la variación interespecífica y las relaciones filogenéticas en especies de *Coffea* usando ensayos en PCR.

El artículo "Hidrogeología de la cuenca del río Itzapa, Departamento de Chimaltenango, Guatemala", de Isaac Herrera, condensa información sobre geología, hidrología, aguas subterráneas e hidrogeoquímica con el propósito de caracterizar el acuífero que servirá para la formulación de un plan de manejo de aguas subterráneas de San Andrés Itzapa.

Finalmente se presenta el artículo "Tristeza del aguacate" de José H. Calderón Díaz. Concluye que el mejoramiento de las condiciones del cultivo de aguacate y el uso de microorganismos antagónicos podría contribuir a evitar el daño que provoca el hongo (*Phytophthora cinnamomi*).

Los editores

CONTENIDO

- 7** Efecto de la erosión del suelo sobre el costo de tratamiento de agua en la cuenca del río Corumbatai, Brasil
Ariel Abderraman Ortiz López
Ricardo Shiota
- 15** Rentabilidad social de la inmunización pecuaria posterior al Huracán Mitch: El caso de los bovinos en Zacapa, Guatemala
Mamerto Reyes Hernández
Lesbia A. Calderón Aguirre
- 33** Análisis de variación interespecífica y relaciones filogenéticas en especies del género *Coffea* usando ensayos basados en PCR
Carlos Orozco Castillo
- 51** Hidrogeología de la cuenca del río Itzapa, Departamento de Chimaltenango, Guatemala
Isaac Rodolfo Herrera Ibáñez
- 101** Tristeza del aguacate (*Phytophthora cinnamomi* Rands)
José Humberto Calderón Díaz

EFFECTO DE LA EROSIÓN DEL SUELO SOBRE EL COSTO DE TRATAMIENTO DE AGUA EN LA CUENCA DEL RÍO CORUMBATAI, BRASIL

**Ariel Abderraman Ortiz López
Ricardo Shiota**



Resumen

El propósito del artículo es presentar estimaciones sobre el costo operativo adicional del tratamiento de agua para consumo humano, en que se incurre debido a los sedimentos producidos por la erosión hídrica del suelo. Para ello se ajustó una función de costo operativo medio, no homotética, homogénea de grado uno en los precios, de forma *translog*. Los resultados indican que al distribuir el costo operativo adicional del tratamiento de agua entre el total de familias abastecidas, cada familia pagaría US\$0.50 mensualmente debido a la contaminación por sedimentos generados por la erosión del suelo en la cuenca del río Corumbatai. Cada hectárea de terreno del área rural de la cuenca contribuye, en promedio, con US\$2.49 por año al costo operativo de tratamiento de agua. En total, el monto del costo operativo adicional anual de tratamiento asciende a US\$426,240, en promedio, en la cuenca indicada.

Palabras clave: erosión del suelo, costo operativo, tratamiento de agua, cuenca río Corumbatai.

INTRODUCCIÓN

La actividad agrícola, por proveer la mayor parte de los alimentos, puede considerarse una actividad necesaria y deseada por la sociedad. No obstante, ella puede generar efectos externos negativos como la contaminación de cuerpos de agua. La contaminación de los cuerpos de agua puede ocurrir por la erosión de las tierras agrícolas que provoca el aumento de sedimentos en suspensión y arrastra residuos de pesticidas y fertilizantes sintéticos. Los sedimentos en suspensión y los residuos de pesticidas y fertilizantes pueden afectar otras actividades económicas, como el tratamiento de agua para consumo humano e industrial, la recreación, la pesca, la navegación, etc., implicando en aumento de costos o en reducción de utilidad. Algunos estudios [Colacicco *et al.*, 1984, por ejemplo] muestran que, en algunos casos, el valor de los efectos externos de la erosión de las tierras agrícolas es mayor que el valor de su efecto en la unidad productiva. La valoración de los efectos externos negativos de la erosión de las tierras agrícolas es importante porque es un insumo necesario para tomar decisiones en la formulación, implementación y evaluación de programas o proyectos de conservación de suelos y, eventualmente, también en el fortalecimiento de la base de datos necesaria para el ajuste de las cuentas nacionales con aspectos ambientales.

En este artículo se presentan estimaciones de uno de los efectos externos provocado por la erosión de las tierras agrícolas, como lo es el aumento del costo de tratamiento de agua para consumo humano.

En este artículo se presentan estimaciones de uno de los efectos externos provocado por la erosión de las tierras agrícolas, como lo es el aumento del costo de tratamiento de agua para consumo humano. El estudio se desarrolló en la cuenca del río Corumbatai, Sao Paulo, Brasil.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área del estudio

De acuerdo con Koffler [1993], la cuenca del río Corumbatai tiene una extensión de 1,710 km² y ocupa territorio de ocho municipios del estado de Sao Paulo, Brasil. Se localiza entre las coordenadas geográficas de 22° 05' a 22° 30' de latitud sur y de 47° 30' a 47° 50' de longitud oeste. Recibe una precipitación pluvial media de 1,462 mm por año. Es ocupada principalmente por pastos (47% del área) y caña de azúcar (31% del área). Oliveira & Prado [1984] indican que los suelos predominantes en la cuenca pertenecen a los tipos *Typic Paleudult* (46% del área) y *Typic Eutrorthox* (31% del área). Tres plantas de tratamiento de agua para consumo humano producen el 95% del agua potable proveniente de la cuenca. Dos de las plantas de tratamiento abastecen la ciudad de Río Claro (PT1 y PT2) y una de ellas abastece la ciudad de Piracicaba (PT3).

Estimación del costo operativo causado por la erosión del suelo

Para estimar el costo adicional de tratamiento de agua causado por la erosión de las tierras agrícolas, inicialmente se estimó una función hedónica no homotética de costo operativo, de la forma *translog*:

$$\begin{aligned} \text{Log } C_t = & \beta_0 + \beta_1 \text{Log } Ag_t + \frac{1}{2} \beta_2 (\text{Log } Ag_t)^2 + \delta_0 \text{Log } Y_t + \frac{1}{2} \delta_1 \text{Log } (Y_t)^2 + \\ & \sum_{i=1}^n \alpha_i \text{Log } P_{it} + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \phi_{ij} \text{Log } P_{it} \text{Log } P_{jt} + \\ & \sum_{i=1}^n \theta_i \text{Log } P_{it} \text{Log } Ag_t + \varepsilon_t; t = 1, \dots, 120, i = 1, 2, \dots, 5, \\ & j = 1, 2, \dots, 5, i \neq j, ij = ji \end{aligned} \quad (1)$$

donde $\text{Log } C_t$ es el logaritmo natural del costo operativo de tratamiento de agua en el mes t ; $\text{Log } Ag_t$ es el logaritmo natural de la cantidad de agua distribuida en el mes t ; $\text{Log } Y_t$ es el logaritmo natural de la carga de sedimentos en el mes t ; $\text{Log } P_{it}$ es el logaritmo natural del precio del insumo i en el mes t ; β_0 a β_2 , δ_0 y α_i , ϕ_{ij} , y θ_i son parámetros a ser estimados; ε_t es el error; $i = 1$ es el precio del sulfato de aluminio; $i = 2$ es el precio de la cal hidratada; $i = 3$ es el precio del cloro; $i = 4$ es el precio de la electricidad; $i = 5$ es el precio del trabajo; y, $t = 1$ es enero de 1985, ..., $t = 120$ es diciembre de 1994.

La homogeneidad de grado uno en el precio de los insumos fue impuesta a través de las restricciones siguientes:

$$\sum_{i=1}^n \alpha_i = 1; \sum_{i=1}^n \phi_{ij} = \sum_{j=1}^m \phi_{ij} = \sum_{i=1}^n \theta_i = 0 \quad (2)$$

El costo operativo mensual de tratamiento de agua fue estimado sustituyendo en la ecuación (1) el valor medio anual de todas las variables, excepto el valor de carga de sedimentos el cual correspondió al valor medio mensual.

El costo operativo medio mensual fue estimado a través de la fórmula siguiente:

$$COAM_t = \frac{\hat{C}_t}{AT_t} - \frac{\hat{C}_a}{AT_a} \quad (3)$$

donde $COAM_t$ es el costo operativo adicional medio de tratamiento de agua en el mes t ; $\hat{C}_t$ es el costo operativo de tratamiento de agua estimado para el mes t ; $\hat{C}_a$ es el costo operativo de tratamiento de agua estimado para el mes de agosto³; AT_t es la cantidad de agua tratada en el mes t ; y, AT_a es la cantidad de agua tratada en el mes de agosto, en 1990.

El costo operativo medio mensual adicional de tratamiento de agua para la PT3 fue multiplicado por la cantidad de agua distribuida por las PT1 y PT2 para obtener el costo operativo adicional mensual de tratamiento de agua de ambas PTs. La sumatoria de los costos operativos adicionales mensuales de las tres PTs generó el costo operativo adicional de tratamiento de agua para toda la cuenca. El costo operativo adicional anual, para 1990, fue calculado sumando el valor del costo adicional mensual, excepto el de agosto. Finalmente, el costo adicional anual fue dividido entre el número de familias abastecidas en 1990 y el número de hectáreas de la cuenca para estimar el gasto adicional por familia y por hectárea, causado por la erosión de las tierras de la cuenca.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El cuadro 1 muestra el resultado de la estimación de la función hedónica de costo operativo de tratamiento de agua, eq. (1), homogénea de grado 1 en los precios de los insumos y sin los efectos cuadráticos de la cantidad de agua distribuida y la carga de sedimentos (eliminados por problemas de colinealidad). Además,

El costo operativo medio mensual adicional de tratamiento de agua para la PT3 fue multiplicado por la cantidad de agua distribuida por las PT1 y PT2 para obtener el costo operativo adicional mensual de tratamiento de agua de ambas PTs.

se incluyen los coeficientes de dos variables binarias incluidas para captar el efecto de outliers en el costo

Cuadro 1
PARÁMETROS ESTIMADOS PARA CADA UNA DE
LAS VARIABLES CONSIDERADAS EN LA FUNCIÓN
DE COSTO OPERATIVO DE TRATAMIENTO DE AGUA
DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO 3 (PIRACICABA).

Variable	Parámetro estimado
Intercepto	-14.6084*
Agua distribuida (A)	1.9634*
Carga de sedimentos (Y)	0.0722*
Precio del sulfato de aluminio (ps)	-2.3681
Precio de la cal (pc)	1.5011
Precio del cloro (pcl)	-0.7784
Precio de la mano de obra (sal)	5.6843*
Precio de la electricidad (ele)	-3.0390
pspc	0.0663
pspcl	0.3080***
pssal	-0.1693
psele	0.2670
pcpcl	0.1129
pcsal	0.0246
pcele	-0.4517
pclsal	-0.3444
pclele	-0.1120
salele	0.2987
psA	0.2267
pcA	-0.1311
pclA	0.1523
salA	-0.7141*
eleA	0.4662***
binaria	-0.3248*
binaria1	0.1266
F	59.5140*
R cuadrado	0.9117
Durbin-Watson	2.1090

* significativo al 0.01;

** significativo al 0.05;

*** significativo al 0.10.

Cuadro 2
COSTO OPERATIVO ADICIONAL DE TRATAMIENTO DE
AGUA PARA CONSUMO HUMANO, CAUSADO POR LA EROSIÓN DE
LAS TIERRAS DE LA CUENCA DEL RÍO CORUMBATAI, BRASIL, 1990.

Tipo de costo	Valor estimado en US\$
Costo operativo adicional anual	426,240
Costo operativo adicional por familia (mensual)	0.50
Costo operativo adicional por hectárea (anual)	2.49

Fuente: estimaciones del estudio.

operativo, causados por aumentos salariales para el personal de las plantas de tratamiento de agua.

Los resultados presentados en el cuadro 1 indican que el modelo estimado es significativo en su conjunto, los coeficientes estimados para las variables relevantes en el análisis son significativos, no existe evidencia de la presencia de autocorrelación y el coeficiente de determinación es apropiado para estimar los costos operativos mensuales. El coeficiente estimado para la variable carga de sedimentos (Y) indica que, en el margen, el incremento de uno por ciento en la carga de sedimentos causa un incremento de 0.07 por ciento en el costo operativo de tratamiento de agua. Ese resultado es similar al obtenido por Holmes (1988).

El cuadro 2 presenta las estimaciones del costo operativo adicional de tratamiento de agua causado por la erosión de las tierras de la cuenca.

CONCLUSIONES

El estudio generó estimaciones del costo operativo adicional de tratamiento de agua causado por la erosión de las tierras de la cuenca del río Corumbatai en el

estado de Sao Paulo, Brasil. Se pretende, con los resultados, contribuir al conocimiento de las consecuencias económicas de la erosión y, eventualmente, subsidiar el proceso de planificación del uso sostenido de las tierras agrícolas.

Aparentemente, el costo adicional por familia es bajo. No obstante, el mismo no incluye el costo adicional de mantenimiento del equipo (principalmente bombas). Además, para obtener una idea más completa del costo de los efectos externos de la erosión de las tierras de la cuenca, será preciso estimar el costo adicional de otras actividades económicas desarrolladas en la cuenca, como la recreación, el tratamiento del agua para usos industriales y el riego.

REFERENCIAS CITADAS

- COLACICCO, D; OSBORN, T.; ALT, K. 1989. Economic damage from soil erosion. *Journal of Soil and Water Conservation (E.U.)* 44 (1):35-9.
- HOLMES, T.P. 1988. The off-site impact of soil erosion on the water treatment industry. *Land Economics (E.U.)* 64 (4):356-66.
- KOFFLER, N.F. 1993. Uso das terras da bacia do rio Corumbataí em 1990. *Geografia (Bra)* 18 (1):135-50.
- OLIVEIRA, J.B. de; PRADO, H. do. 1984. Levantamento pedológico semidetalhado do Estado de São Paulo. *Boletim Técnico (Bra)* n. 98.

RENTABILIDAD SOCIAL DE LA INMUNIZACIÓN PECUARIA POSTERIOR AL HURACÁN MITCH: EL CASO DE LOS BOVINOS EN ZACAPA, GUATEMALA

Mamerto Reyes Hernández
Lesbia A. Calderón Aguirre



Resumen

Con el propósito de determinar la rentabilidad social de la vacunación bovina contra antrax (*Bacillus anthracis*) en animales adultos y el complejo "pierna negra" (*Clostridium chauvoei* y *Clostridium septicum*) en terneros, realizada en el período inmediato al paso del Huracán Mitch por Guatemala y desarrollar/adaptar metodologías para evaluación económica de intervenciones de salud pública animal, en este trabajo se analizó la experiencia de este programa de vacunación en el departamento de Zacapa. Este programa cubrió los municipios de Zacapa, Estandzuela, Río Hondo y Gualán. Como beneficio social de la intervención se tomó el valor de la diferencia entre las ofertas de ganado en pie con y sin programa de vacunación. Por otra parte, debido a la carencia de certidumbre plena sobre la mortalidad que hubiesen ocasionado las enfermedades en ausencia de vacunación, se emplearon tres escenarios de posible mortalidad bovina para estimar la oferta de ganado sin programa, éstos fueron 15, 10 y 5% del hato de los cuatro municipios. Evaluando desde la perspectiva de los costos variables, los resultados obtenidos muestran relaciones B/C que oscilan entre 41.31 y 123.88, y entre 26.47 y 79.38, cuando se evalúa desde la perspectiva de los costos totales. En ambos casos los resultados reflejan la alta rentabilidad que esta acción de coyuntura registró para la sociedad nacional y apoyan su empleo para enfrentar contingencias futuras.

Palabras claves: *Bacillus anthracis*, *Clostridium chou-*

voei, *Clostridium septicum*, vacunación, bovinos, rentabilidad social.

INTRODUCCIÓN

A finales de octubre y principios de noviembre de 1998, las diferentes etapas de formación y desarrollo del Huracán Mitch, ocasionaron graves daños materiales y humanos en la Costa Atlántica de Guatemala, en casi todo el territorio de Honduras y en gran parte del de Nicaragua.

La agricultura en las zonas de influencia del huracán se vió gravemente afectada y en el período inmediato que siguió a su paso, la ganadería de esta zona quedó inserta en un medio ambiente favorable para el desarrollo de graves enfermedades que son endémicas en Guatemala, tales como el antrax. Como es sabido, los bacilos causantes de estas enfermedades se reproducen por esporas y emergen con mucha virulencia después de un cambio meteorológico importante, como un largo período de sequía o una lluvia prolongada [Blood *et al*, 1986], tal como la provocada por el Mitch.

Para enfrentar una potencial epizootía en Guatemala, las autoridades del Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación (MAGA), pusieron en ejecución un plan de contingencia. Este fue el Programa de Emergencia en Sanidad Animal, el cual consideró una campaña de vacunación bovina contra antrax (*Bacillus anthracis*) en adultos y el complejo "pierna negra" (*Clostridium chauvoei* y *Clostridium septicum*) en terneros, en toda el área afectada por el

huracán (departamentos de Izabal, Zacapa, El Progreso, Jutiapa, Santa Rosa y Escuintla). La inmunización de animales adultos se hizo con la vacuna contra antrax. Por su parte, la vacunación de terneros se hizo con un biológico "doble" que inmuniza contra Carbunco Sintomático y el Edema Maligno.

Como complemento a la vacunación, el programa consideró la búsqueda de animales muertos y su incineración para evitar riesgos mayores por contaminación de suelos y agua. El programa fue ejecutado de principios de noviembre de 1998 a mediados de enero de 1999.

En Guatemala, no existen estimaciones del monto de beneficios que obtiene la economía nacional como resultado de este tipo de intervenciones. Con este trabajo se busca contribuir a llenar este vacío de información. Tomando como caso de estudio la experiencia del programa de vacunación ejecutado en el área afectada del departamento de Zacapa, se persigue determinar la pertinencia de invertir fondos gubernamentales en programas de salud pública animal. El área en cuestión la forman las comunidades de los municipios de Zacapa, Estanzuela, Río Hondo y Gualán que se encuentran en la vega de los ríos Motagua, Grande, Jones, Santiago, Achiote y Managuá.

Por otra parte, en este trabajo se busca determinar la rentabilidad social de la vacunación bovina contra antrax y el complejo "pierna negra", realizada en Zacapa; y adaptar/desarrollar metodologías para la evaluación social de intervenciones de esta naturaleza.

En este trabajo se busca determinar la rentabilidad social de la vacunación bovina contra antrax y el complejo "pierna negra", realizada en Zacapa; y adaptar/desarrollar metodologías para la evaluación social de intervenciones de esta naturaleza.

DESCRIPCIÓN DEL DEPARTAMENTO DE ZACAPA

El departamento de Zacapa se encuentra en el noro-
riente de la República de Guatemala y geográfica-
mente, su cabecera departamental se localiza en 15°
58' 21" latitud Norte y 87° 31' 42" longitud Oeste.
Su altitud es pequeña y en general su clima es
caluroso. Su cabecera se encuentra a 220 metros sobre
el nivel de mar y las temperaturas mínima y máxima
en promedio son de 21.2° y 34.2° centígrados, respec-
tivamente. La temporada de lluvia va de mayo a
octubre, con una precipitación pluvial anual de 471.2
mm [INE, 1996].

Este departamento cuenta con 10 municipios,
los cuales son: Zacapa, Estanzuela, Río Hondo,
Gualán, Teculután, Usumatlán, Cabañas, San Diego,
La Unión y Huité. Todos los municipios cuentan con
infraestructura para comunicarse, tales como caminos
vecinales y carreteras y algunos de ellos se encuentran
directamente en la ruta del ferrocarril. En general,
todos los municipios tienen acceso a la Ruta del
Atlántico que es la principal arteria que los comunica
con la cabecera departamental, la ciudad de Guate-
mala y los puertos del Atlántico.

*En materia
demográfica,
según el Censo
de Población
de 1994, el
departamento
de Zacapa
está habitado
por 157,008
personas, de
las cuales el
71.4% vive en
el área rural.*

En materia demográfica, según el Censo de
Población de 1994, el departamento de Zacapa está
habitado por 157,008 personas, de las cuales el 71.4%
vive en el área rural. En términos de alfabetismo, el
66.6% de las personas de 15 años o más, sabe leer
y escribir. La población económicamente activa es
de 46,257 personas, de las cuales el 61.3% se encuen-
tra en el sector agropecuario [INE, 1996].

El departamento de Zacapa tiene una superficie de 2,690 km² y en su mayoría se trata de un territorio semiárido. De acuerdo con el Censo Agropecuario de 1979, este departamento tiene 8,430 fincas que cubren un área de 121,536 hectáreas (ha). La superficie en fincas se encuentra distribuida en 28,139 ha de cultivos anuales, 6,132 ha de cultivos permanentes, 39,806 ha de pastos, 43,892 ha de bosques y montes y 3,567 ha clasificadas como otras tierras [DGE, 1982].

Los principales cultivos son maíz, café, frijol, tabaco y tomate y en los últimos veinte años ha cobrado importancia el cultivo de hortalizas tropicales destinadas al mercado externo. De acuerdo con el Censo Agropecuario, en el año agrícola 1978-79, en este departamento se cultivaban 1,011 ha de tomate y 1,446 ha de tabaco, las cuales representaban el 20% y 41.5% de las superficies nacionales de estas solanáceas, respectivamente [DGE, 1982]. No se dispone de datos más recientes pero estos rubros continúan teniendo importancia en la zona.

En el campo pecuario, el departamento de Zacapa destina un tercio de la superficie en fincas a pastos, lo cual le da alguna relevancia ganadera. De acuerdo con el Censo Agropecuario de 1979, en este departamento se criaban 57,374 cabezas de ganado bovino, de las cuales el 51.6% se encontraban en Gualán y el 22% en Zacapa y Río Hondo [DGE, 1982]. En la actualidad, el hato del departamento se concentra en estos mismos municipios aunque ya no es tan grande como en el pasado, ya que parte del mismo ha sido mudado a fincas de productores de Zacapa que se encuentran en el vecino departamento de Izabal.

El departamento de Zacapa destina un tercio de la superficie en fincas a pastos, lo cual le da alguna relevancia ganadera.

ENFOQUES PARA EVALUACIÓN DE INTERVENCIONES AGROPECUARIAS

Para evaluar proyectos como el presente, en la literatura se encuentran tres enfoques alternativos que han sido desarrollados para evaluar la rentabilidad social de innovaciones tecnológicas. Éstos son los siguientes: el enfoque de los excedentes económicos, el de la función de producción y el de la imputación contable que aquí se denomina el enfoque de las ganancias de los agricultores.

El enfoque de los excedentes económicos requiere de un modelo de mercado que permita determinar los cambios en los excedentes de productores y consumidores resultantes de la adopción de la innovación tecnológica por parte de los productores. Estos cambios constituyen los beneficios, los cuales al analizarse en conjunto con los costos de investigación, desarrollo y transferencia de la innovación, permiten el cálculo de indicadores de rentabilidad. Algunas aplicaciones de este enfoque en América Latina se encuentran en Scobie y Posada [1976] y Reyes Hernández [1997 y 1998].

El enfoque de la función de producción se fundamenta en la incorporación de una variable proximal del conocimiento tecnológico en la función de producción de un sector, rubro o especie de cultivo, como factor de producción adicional a las variables clásicas mano de obra, tierra, capital y clima. Una aplicación de obligatoria lectura de este enfoque se encuentra en Griliches [1964].

El enfoque de las ganancias de los agricultores sigue una perspectiva más apegada al productor

individual y mide las ganancias privadas que éste obtiene como resultado de adoptar las innovaciones tecnológicas. Este enfoque es muy versátil y se adapta tanto a estudios de cobertura nacional, regional o subregional. Para estimar los beneficios, con este enfoque se asume que el productor tiene una oferta perfectamente inelástica que enfrenta una demanda infinitamente elástica. Esta concepción de mercado es un caso extremo del enfoque de los excedentes económicos. Algunas de sus aplicaciones en Centroamérica son los estudios de Martínez y Saín [1983] y de Saín y Matute [1993].

METODOLOGÍA

El modelo conceptual

Para evaluar la rentabilidad de la inmunización de bovinos se siguió el enfoque de las ganancias de los agricultores. Para adaptar este enfoque se asumió que los productores de los municipios de Zacapa, Estandzuela, Río Hondo y Gualán, operan en un mercado marginal y por tanto no pueden afectar el nivel de precios, por el contrario, los precios a que compran o venden ganado ya fueron establecidos en el mercado nacional de ganado en pie y para ellos, éstos constituyen un dato para su proceso de toma de decisiones. Este supuesto significa que los productores se encuentran operando bajo condiciones de competencia perfecta.

Por otro lado, se mantuvo el supuesto sobre la inelasticidad de la oferta que trae implícito el enfoque adoptado. Este supuesto sugiere que una vez que los productores han tomado sus decisiones, cualquier

cambio en el mercado no puede modificar las cantidades ofrecidas de ganado en pie.

Cabe indicar que para la crianza de ganado para la venta o para cualquier actividad agropecuaria de carácter permanente, como la siembra de frutales o café, este supuesto no está muy alejado de la realidad cuando se trata del corto plazo o de un período con un horizonte temporal tan inmediato como el que tuvo el programa de sanidad que acá se evalúa.

El modelo adaptado del enfoque de las ganancias de los agricultores se presenta en la figura 1. La línea Q_d es la cantidad demandada de ganado y representa la demanda de competencia perfecta que enfrentan los productores de los cuatro municipios afectados por el Huracán Mitch. P_N es el precio de equilibrio establecido en el mercado nacional. S_{si} es la oferta de ganado que existiría si no hubiese sido ejecutado

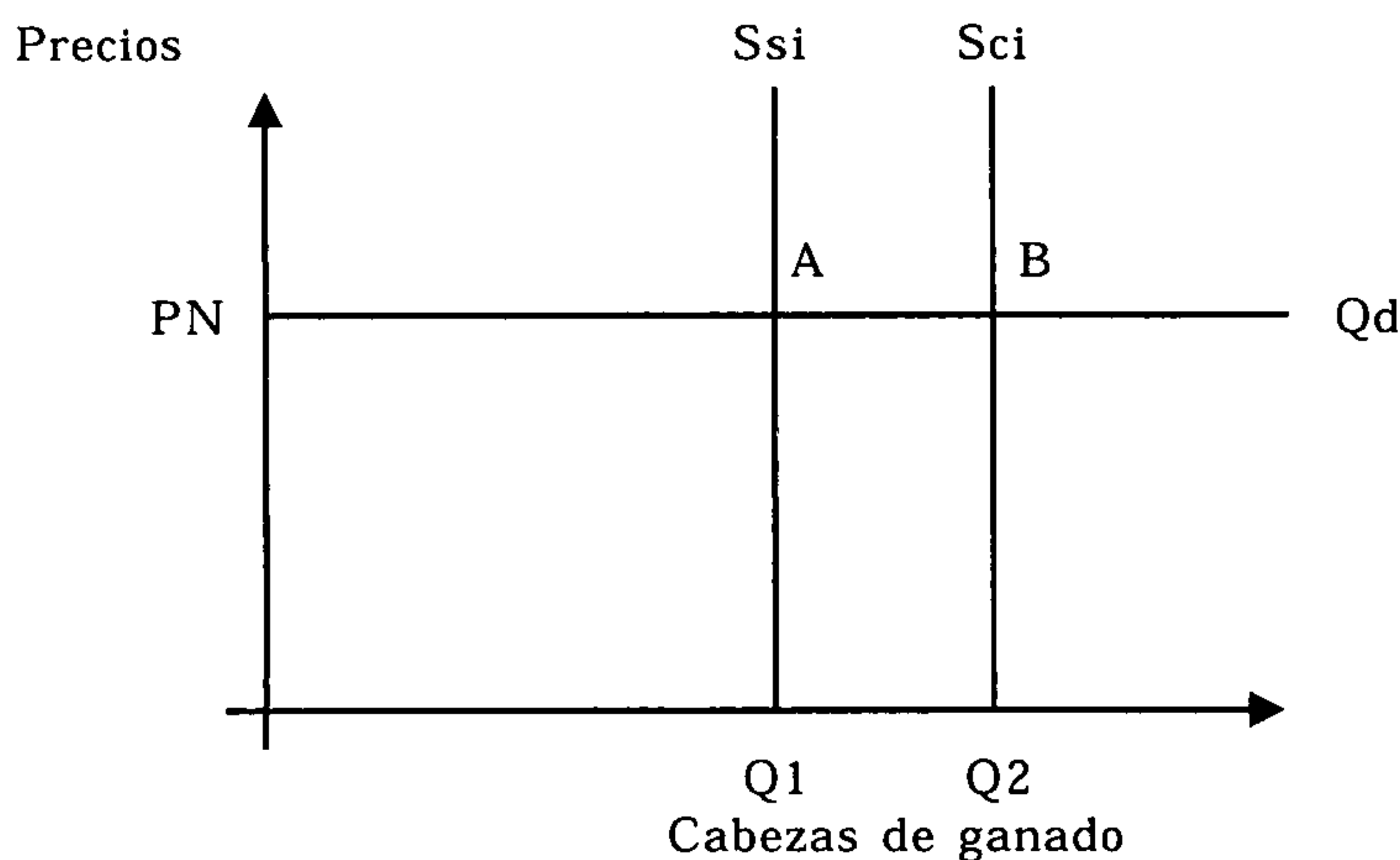


Figura 1. Modelo conceptual del mercado de ganado en pie en los Municipios de Zacapa, Estanzuela, Río Hondo y Gualán, Departamento de Zacapa, Guatemala, con y sin programa de inmunización.

el programa de vacunación, en otras palabras, es la oferta sin la intervención. Sci, por su parte, es la oferta de ganado después de la intervención.

El modelo conceptual indica que en ausencia de intervención, los productores hubiesen ofrecido la cantidad de ganado Q1, pero como existió la intervención, pueden ofrecer Q2. La diferencia entre Q2 y Q1 es el ganado que se hubiese muerto sin la vacunación, de donde se deduce que como resultado del programa de inmunización, los productores se benefician con el valor $(Q2-Q1) PN$. En términos de la figura 1, el beneficio es el rectángulo Q1 Q2 B A, el cual también representa la ganancia que obtiene la sociedad como resultado de esta intervención en Zacapa.

Escenarios para estimación de beneficios

Para estimar los beneficios se siguió un formato experimental que permite comparar los hatos que se tienen post programa de vacunación y el que existiría si no se hubiese inmunizado al ganado con este programa.

Como no se tiene certidumbre plena sobre cual sería el hato en ausencia de vacunación, fue necesario asumir tres escenarios de mortalidad bovina. En el primero, siguiendo al proceso que sigue la toma de una decisión (identificación del problema, selección del medio para solucionarlo, decisión de usarlo y usarlo), se asumió que como resultado del rezago en que incurre el productor entre la toma de conciencia de la existencia de las enfermedades y la aplicación del medio correctivo, éstas pueden matarle al 15% del hato.

El segundo escenario es menos pesimista y en él se asume que la mortalidad derivada de las enfermedades puede ser del 10% del hato. Y en el tercer escenario, la mortalidad asumida es del 5% del hato.

Para apoyar estos escenarios, se puede citar que un foco de antrax identificado en el municipio de Estanzuela durante la ejecución de la campaña de vacunación, mató dos de sesenta cabezas que poseía un productor, esto es un 3.3% del hato. Los efectos de la enfermedad se manifestaron en una semana. Cabe indicar que la acción inmediata del programa de sanidad animal detuvo el desarrollo de una epizootia.

Costos de la intervención

Los costos de la intervención los integran los desembolsos directos hechos para ejecutar el programa (salarios de los asistentes de campo, vacunas, combustibles y viáticos), el tiempo de los médicos veterinarios que condujeron el programa, un porcentaje por concepto de la administración de la coordinación departamental del MAGA y un porcentaje por errores u omisiones involuntarias.

Índice de eficiencia económica

El programa de vacunación evaluado en este trabajo fue concebido como una acción de coyuntura y como tal, es una acción de corto plazo y su producto inmediato es evitar o reducir la mortalidad bovina por antrax y el complejo "Pierna Negra". En este horizonte de tiempo, un índice de eficiencia económica apropiado

es la relación beneficio /costo. Se calculó un índice para cada escenario de mortalidad bovina.

RESULTADOS

Los costos de la inmunización se presentan en el cuadro 1. Para completar los costos variables se adicionó un 10% por omisiones involuntarias. Por otra parte, a los costos fijos se les agregó el 10% de los costos variables como costo de administración. En total la operación de inmunización en Zacapa tuvo un costo variable de Q45,596 y un costo fijo de Q25,560, los cuales dan un costo total de Q71,156.

Cuadro 1
COSTOS DEL PROGRAMA DE INMUNIZACIÓN
Departamento de Zacapa, noviembre de 1998 – enero de 1999

Rubros de costo	Costos (Quetzales)
Costos variables	
1. Asistentes de campo (332 días hombre)	16,600
2. Viáticos (276 días)	11,486
3. Productos biológicos (18,613 dosis)	11,540
4. Combustibles (173 galones de gasolina)	1,825
5. Omisiones involuntarias (10% de la suma de 1, 2, 3 y 4)	4,145
Total costos variables	45,596
Costos fijos	
6. Médicos veterinarios (3.5 meses)	21,000
7. Administración (10% de los costos variables)	4,560
Total costos fijos	25,596
Costos totales	71,156

En el cuadro 2 se presenta la composición del hato bovino de los municipios atendidos en la campaña de vacunación y los precios del ganado. Cabe indicar que este hato corresponde al inmunizado en la campaña de vacunación y alcanza la cifra de 18,613 cabezas. Su precio promedio como ganado en pie es de Q2,023.10 por cabeza.

Para obtener el valor del hato en los diferentes escenarios utilizados, se asumió que todas las categorías del ganado se destinan a la venta para destace. Este es un supuesto demasiado conservador y subestima el valor del ganado dedicado a la reproducción, producción de leche y tracción. Sin embargo, es necesario resaltar que las inferencias hechas bajo la restricción de este supuesto son valiosas y pueden considerarse como una estimación del límite inferior del valor del ganado y de los beneficios del programa de inmunización evaluado.

Cuadro 2
COMPOSICIÓN DEL HATO BOVINO DEL
ÁREA AFECTADA POR EL HURACÁN MIGHT
 Departamento de Zacapa, noviembre de 1998 - enero de 1999

Categoría de animal	Cabezas	Precio unitario (Quetzales)
Terneros (as)	5,601	1,200
Novillos	2,685	2,310
Novillas	3,140	2,100
Vacas	6,553	2,320
Toros	395	4,875
Bueyes	239	4,225
Total	18,613	2,023.10 *

* Precio promedio ponderado

En el cuadro 3 se presentan estimaciones de la oferta de ganado en pie y de la cantidad de ganado perdido para cada uno de los escenarios de mortalidad asumidos. Por otra parte, también se consigna el valor de tales pérdidas. Puede observarse que las pérdidas ocasionadas por las enfermedades hubiesen sido de 931 a 2,792 cabezas, las cuales representan valores que oscilan entre Q1.9 y Q5.6 millones.

En el cuadro 4 se presentan los resultados del análisis de eficiencia económica. Este cuadro contiene los costos de la inmunización bovina y las ganancias que se lograron con la misma. Como se indicó en la metodología, las ganancias son el valor de las pérdidas que se evitaron con la vacunación. El cuadro 4 presenta los costos relevantes de la vacunación bovina desde dos perspectivas. Por un lado, se asume que los costos relevantes de la decisión de ejecutar el programa de sanidad animal son los costos variables y por otro lado, se toman en consideración los costos totales de la intervención.

La primera perspectiva corresponde a una visión de presupuestos parciales y permite determinar la

Cuadro 3
OFERTAS DE GANADO BOVINO EN PIE CON Y SIN
EL PROGRAMA DE INMUNIZACIÓN EN TRES ESCENARIOS DE
MORTALIDAD BOVINA EN EL ÁREA AFECTADA POR EL HURACÁN MITCH
 Departamento de Zacapa, noviembre de 1998 – enero de 1999

Oferta/escenario	Cabezas De ganado	Ganado perdido por las enfermedades	
		Cabezas	Valor (Quetzales)
Oferta con programa	18,613	--	--
Oferta sin programa			
15% de mortalidad	15,821	2,792	5,648,495
10% de mortalidad	16,752	1,861	3,764,989
5% de mortalidad	17,682	931	1,883,506

rentabilidad de los costos adicionales en que incurrió el MAGA para la ejecución del programa de inmunización. Este enfoque no toma en cuenta los costos fijos, pues estos costos debían ser cubiertos por el MAGA indistintamente que su uso se orientase o no, a apoyar la intervención bajo evaluación. Por su parte, la segunda perspectiva sigue el enfoque de presupuestos totales y permite determinar la rentabilidad de los costos totales de la intervención.

Como puede observarse en el cuadro 4, al evaluar desde la perspectiva de los costos variables, el programa de vacunación registra relaciones B/C que oscilan entre 41.31 y 123.88, las cuales indican que por cada Quetzal invertido en los costos adicionales que requirió el MAGA para ejecutar el programa, retornaron entre Q41.31 y Q123.88, en beneficios para la sociedad. Estos resultados muestran que el financiamiento

Cuadro 4
RENTABILIDAD SOCIAL DEL PROGRAMA DE INMUNIZACIÓN BOVINA
Departamento de Zacapa, noviembre de 1998 – enero de 1999

Tomando los costos variables como los costos relevantes de la decisión de ejecutar el programa de inmunización

Escenario de mortalidad evitada	Beneficio (Quetzales)	Costos variables (Quetzales)	Relación B/C
15%	5,648,495	45,596	123.88
10%	3,764,989	45,596	82.57
5%	1,883,506	45,596	41.31

Tomando los costos totales como los costos relevantes de la decisión de ejecutar el programa de inmunización

Escenario de mortalidad evitada	Beneficio (Quetzales)	Costos variables (Quetzales)	Relación B/C
15%	5,648,495	71,156	79.38
10%	3,764,989	71,156	52.91
5%	1,883,506	71,156	26.47

adicional que fue necesario para ejecutar este programa de sanidad animal, permitió obtener altos beneficios por unidad de costo para la sociedad nacional.

Por otra parte, los resultados de analizar desde la perspectiva de los costos totales también reflejan la alta rentabilidad social del programa evaluado.

En el cuadro 4 también puede apreciarse que desde el punto de vista de los costos totales, la campaña de inmunización registró relaciones B/C que oscilan entre 26.47 y 79.38.

Estos altos coeficientes de eficiencia económica se deben al alto valor que posee la ganadería bovina. Por otra parte, corroboran el hecho de que la sanidad animal no es solamente una práctica para incrementar la producción sino también una vía para proteger una forma valiosa de capital del agricultor: el ganado.

IMPLICACIONES DE POLÍTICA

En una época como la actual en que los cambios climáticos provocados por la Corriente del Niño están haciendo más comunes las ocurrencias de largas sequías seguidas de largos períodos de intensas lluvias, que ponen al hato bovino nacional en mayores riesgos de epidemias de enfermedades provocadas por bacilos, la disposición de gasto público para intervenciones de este género se hace más urgente, no sólo por su efecto económico y de salud animal de corto plazo, sino también porque constituyen una vía directa para evitar problemas sociales y económicos derivados en el corto plazo que podrían tener efectos negativos en el mediano y largo plazo.

Entre éstos se puede citar, la reducción de la

oferta de proteína animal en el mercado interno que podría estimular presiones inflacionarias. Otro caso es la pérdida de especímenes bovinos adaptados al medio ecológico y socioeconómico nacional que reduciría la productividad de la ganadería nacional.

CONCLUSIONES

- i. La vacunación de bovinos contra antrax y el complejo "Pierna Negra" realizada en Zacapa en el período inmediato al paso del huracán Mitch por el territorio nacional, fue una intervención que registró una alta rentabilidad social, tanto desde la perspectiva de los costos adicionales que requirió el MAGA para su ejecución como desde la perspectiva de su costo total. Las relaciones B/C obtenidas en los escenarios evaluativos empleados oscilan entre 41.31 y 123.88, cuando se evalúa desde la perspectiva de los costos variables y entre 26.47 y 79.38, cuando se evalúa considerando los costos totales.
- ii. En términos de protección animal y de acuerdo con los escenarios de posible mortalidad bovina asumidos, esta acción de coyuntura evitó la pérdida de 931 a 2,792 cabezas de ganado, las que en valores económicos hubiesen representado pérdidas de Q1.9 a Q5.6 millones para los productores.

BIBLIOGRAFÍA

BLOOD, D. C.; O. M. RADOSTITS; J. A. HENDERSON; J. H. ARUNDEL y C. C. GAY (1986) Medicina Veterinaria. 6ª. Edición. Traducción del inglés de F. Colchero Arrubarrena y A. Garst Thalheimer. México, Nueva Editorial Interamericana.

DIRECCIÓN GENERAL DE ESTADÍSTICA (DGE) (1982) Número y superficie de fincas y características principales. III Censo Nacional Agropecuario 1979. Volumen I, tomos I y II. Guatemala, DGE.

DIRECCIÓN GENERAL DE ESTADÍSTICA (DGE) (1982) Cultivos y producción agrícola y forestal. III Censo Nacional Agropecuario 1979. Volumen II, tomos I y II. Guatemala, DGE.

DIRECCIÓN GENERAL DE ESTADÍSTICA (DGE) (1982) Existencia de animales y productos agropecuarios. III Censo Nacional Agropecuario 1979. Volumen III, tomo I. Guatemala, DGE.

GRILICHES, Z. (1964) "Research Expenditures, Education, and the Agricultural Production Function" in *American Economic Review* 45:419-428.

INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA (INE) (1996) Departamento de Zacapa. X Censo Nacional de Población y V de Habitación. Guatemala, INE.

MARTÍNEZ, J.C. and G. SAIN (1983) The Economic Returns to Institutional Innovations in Agricultural Research: On-farm Research in IDIAP Panamá. CIMMYT Working Paper 04/83. México, CIMMYT.

REYES HERNÁNDEZ, M. (1997) "La Rentabilidad Social de la Investigación Agrícola Gubernamental en Granos Básicos: El Caso del Maíz en Guatemala, 1973-90" in *Agronomía Mesoamericana* 8(2):12-20. [Costa Rica]

- REYES HERNÁNDEZ, M. (1998) "Retornos Sociales de la Investigación Agrícola: El Caso del Arroz en Guatemala, 1973-90" in *Tikalía* XVI(2):65-80. [Guatemala]
- SAIN, G. y R. MATUTE (1993) "Cambio Tecnológico e Investigación en Fincas en el Departamento de Atlántida, Honduras" in Síntesis de Resultados Experimentales del PRM. Volumen 4. Guatemala, Programa Regional de Maíz de Centroamérica y el Caribe-CIMMYT. Páginas 198-211.
- SCOBIE, G. and R. POSADA (1976) The Impact of High-yielding Rice Varieties in Latin America With Special Emphasis on Colombia. A Preliminary Report. Cali, Colombia, CIAT.

ANÁLISIS DE VARIACIÓN INTERESPECÍFICA Y RELACIONES FILOGENÉTICAS EN ESPECIES DEL GÉNERO *COFFEA* USANDO ENSAYOS BASADOS EN PCR

Carlos Orozco Castillo



Resumen

Las relaciones genéticas entre accesiones de café, que representan 11 de las más importantes especies del género *Coffea* utilizadas en los programas actuales de mejoramiento genético del cultivo fueron examinadas usando marcadores RAPD. Iniciadores de Secuencias Específicas en regiones de ADN de cloroplasto y mitocondria fueron usados para complementar los datos de RAPD. Estimadores de variabilidad basados en el número de productos amplificados compartidos, ubicó a las especies en tres distintos grupos, los cuales fueron consistentes con los datos obtenidos de fenotipos derivados del ADN del cloroplasto, el origen geográfico de las especies y estudios previos basados en características morfológicas. *Coffea eugenioides* ($2n = 2x = 22$), presentó la mayor similitud con el café cultivado *C. Arábica* ($2n = 4x = 44$), y conjuntamente con *C. Stenophylla* y *C. Humilis* mostraron el mismo fenotipo derivado del ADN del cloroplasto, por lo que puede sugerirse que una de estas tres especies podría ser el progenitor materno de *C. Arábica*. Estos resultados proveen un mejor entendimiento de las relaciones entre especies dentro del género *Coffea* y pueden ayudar en la identificación de las fuentes genéticas más apropiadas para su incorporación en los programas de mejoramiento del café.

INTRODUCCIÓN

Mientras más de 100 distintas especies han sido identificadas, la producción comercial de café se basa mayormente en dos especies: *C. arabica* y *C. canephora*. Todas las otras especies son cultivadas de manera limitada, o son encontradas únicamente en las áreas silvestres o colecciones de café mantenidas en algunos centros de investigación. Muchas de estas especies, como el caso de *C. eugenoides* y *C. stenophylla* tienen genes favorables que pueden ser transferidos a las especies comerciales [Carvalho, 1985]. Puesto que la hibridación interespecífica puede ocurrir frecuentemente en el género, la fuente genética que es útil para los programas de mejoramiento de los cultivares de *C. arabica*, consiste prácticamente de todas las especies del género *Coffea*. La utilización de estos recursos y el entendimiento de las relaciones filogenéticas de los miembros de este taxa es de vital importancia, ya que la habilidad para crear híbridos está relacionada con las distancias genéticas entre los individuos que se utilizarían para los cruzamientos.

Métodos convencionales de clasificación taxonómica basados en caracteres morfológicos han sido conducidos en especies de *Coffea* [Chevalier, 1947], y las relaciones entre especies utilizando distribución geográfica y adaptación ecológica han sido establecidas [Leroy 1980]. Además, estudios de cruzamientos y análisis citológicos [Carvalho y Mónaco, 1968; Charrier, 1977; Louarn, 1993], marcadores bioquímicos [Berthaud, 1986] y variación del ADN citoplásmico [Berthou *et al.*, 1983] han sido utilizados para estudiar relaciones filogenéticas entre especies de *Coffea*. Sin embargo, estos estudios han tenido sólo un éxito

limitado en determinar estas relaciones, y muchas inconsistencias existen todavía al respecto. Por ejemplo, uno de los cuestionamientos básicos, aún no respondidos en la filotecnia del café, es el referente al origen de *C. arabica*. Esta especie es autógama, y exhibe herencia disómica, considerándose un alo-tetraploide segmentado [Grassias y Jammacher, 1975], lo cual sugiere que ha sido derivado de dos especies diploides.

De acuerdo a Charrier [1978] un genoma nuclear debería ser originado en un miembro del género *Coffea*, y el otro genoma proviene posiblemente de especies silvestres del subgénero *Eucoffea* o en un género vecino relacionado, tal el caso de *Paracoffea* J.F. o *Psilanthus* Hook F. En este trabajo, una combinación de RAPDs [Polimorfismos Amplificados de ADN al Azar] e Iniciadores de Secuencias específicas de ADN (STS) en mitocondria y cloroplasto han sido utilizados para estimar el nivel de variación genética entre accesiones de 11 diferentes especies del género *Coffea*.

MATERIALES Y MÉTODOS

MATERIAL GENÉTICO: 18 accesiones del género *Coffea* fueron utilizados en este estudio. Estas accesiones conjuntamente con su origen geográfico son listadas en el cuadro 1.

PROCEDIMIENTOS DE ADN. El aislamiento de ADN y los procedimientos para RAPDs y STS son descritos en Orozco Castillo [1995]. Se utilizaron únicamente aquellos productos amplificados claramente definidos, por lo que de 50 iniciadores monitoreados, se obtuvieron datos de sólo 15 primers, los cuales aparecen en el cuadro 2.

En este trabajo, una combinación de RAPDs [Polimorfismos Amplificados de ADN al Azar] e Iniciadores de Secuencias específicas de ADN (STS) en mitocondria y cloroplasto han sido utilizados para estimar el nivel de variación genética entre accesiones de 11 diferentes especies del género Coffea.

ANÁLISIS DE ADN EN MITOCONDRIA Y CLOROPLASTO. Primers específicos que amplifican regiones que no codifican en ADN del cloroplasto y la región V7 del pequeño gen ribosomal para ARN del ADN de Mitochondria fueron utilizados para detectar diversidad genética entre especies. Los primers específicos para ADN del cloroplasto y mitocondrias que fueron utilizados son listados en el cuadro 3. Estos iniciadores fueron

Cuadro 1
ESPECIES Y GENOTIPOS USADOS PARA
ESTIMAR VARIACIÓN GENÉTICA EN EL GÉNERO *COFFEA*

Especies	Accesión	Origen	Fuente
<i>C. stenophylla</i>	Don G.D8A	Ivory Coast	ORSTOM
<i>C. racemosa</i>	Anon	East Africa	ORSTOM
<i>C. pseudozanguebariae</i> Breds.	Diani	Kenia	ORSTOM
<i>C. humilis</i>	Anon	Costa de Ivory	ORSTOM
<i>C. congensis</i> Froehner	D7	África Central	ORSTOM
<i>C. sessiliflora</i>	Anon	África Central	ORSTOM
<i>C. brevipes</i>	Anon	Costa de Ivory	ORSTOM
<i>C. liberica</i>	Anon	Guatemala	ANACAFE
<i>C. liberica</i> (Excelsa)*	Anon	Guatemala	ANACAFE
<i>C. canephora</i>	Robusta 3751	Indonesia	ANACAFE
<i>C. canephora</i>	Robusta 3753	Indonesia	ANACAFE
<i>C. canephora</i>	Robusta 3580	Congo	ANACAFE
<i>C. eugenoides</i> Moore	Anon	Kenia	ORSTOM
<i>C. eugenoides</i> Moore	Anon	Kenia	ORSTOM
<i>C. arabica</i>	ET57A2167737	Etiopía	CATIE
<i>C. arabica</i>	ETA216733	Etiopía	CATIE
<i>C. arabica</i>	N39	Tanzania	LAR
<i>C. arabica</i>	Caturra	Brasil	ANACAFE

* *C. liberica* (Excelsa) es también conocida como *C. dewevrei*

ORSTOM Institut Francais de Recherche Scientifique pour le Development en Coopération, Montpellier, France.

ANACAFE Asociación Nacional del Café, Guatemala, Centro América.

CATIE Centro Agronómico Tropical para la Investigación y Enseñanza, Costa Rica, Centro América.

LARI Lyamungu Agricultural Research Institute, Moshi, Tanzania

Cuadro 2
PRIMERS Y SUS SECUENCIAS DE BASES USADOS PARA LA
DETECCIÓN DE POLIMORFISMO EN ESPECIES DEL GÉNERO *COFFEA*

Primer	Secuencia
SC10-03	5' CAGTTCGAGG 3'
SC10-04	5' TACCGACACC 3'
SC10-05	5' ACTCAGGAGC 3'
SC10-15	5' GCTCGTCAAC 3'
SC10-32	5' CCCCTCGGCT 3'
SC10-33	5' TCGCCATAGC 3'
SC10-37	5' GCCAATCCTG 3'
SC10-44	5' CCAGGAAGCC 3'
SC10-53	5' CAGGGGACGA 3'
SC10-57	5' GCTGGAAGCG 3'
SC10-63	5' CCTTGCGCTT 3'
SC10-73	5' TCGGCCCTCG 3'
SC10-77	5' AGATAGCGGG 3'
SC10-94	5' GGGGTCGATT 3'
SC10-97	5' TCCGGCTTTC 3'

Cuadro 3
SECUENCIAS DE PRIMERS ESPECÍFICOS (REGIONES DE ADN DE
CLOROPLASTO Y MITOCONDRIA) USADOS PARA LA DETECCIÓN
DE DIVERSIDAD GENÉTICA EN ESPECIES DEL GÉNERO *COFFEA*

Nombre	Secuencia	Región Amplificada
CH-A	5'CATTACAAATGCGATGCTCT 3'	Región intergénica trnT(UGU a trnL(UUA) en ADN de CH
CH-B	5'TCTACCGATTTCGCCATATC 3'	
CH-C	5' CGAAATCGGTAGACGCTACG 3'	Intron tmL(UUA) en ADN de CH
CH-D	5' GGGGATAGAGGGACTTGAAC 3'	
CH-E	5'GGTTCAAGTCCCTCTATCCC3'	Región intergénica trnL(UAA) a FtrnF(GAA) en ADN de CH
CH-F	5'ATTTGAACTGGTGACACGAG3'	
MT-P1V7	5' CTTTCATACAGGTGCTGC 3'	Región V7 de ARNr de mitocondria de planta
MT-P2V7	5' TCACTGGCAGTCCCTCGT 3'	

CH = cloroplasto MT= Mitocondria

preparados de acuerdo al procedimiento indicado por Rusell [1994]. Los productos amplificados fueron digeridos con las enzimas de restricción MboI, RsaI, HaeIII, HinfI, DraI, PstI, EcoRI y TaqI. Los procedimientos de análisis de ADN están indicados en Orozco Castillo [1995].

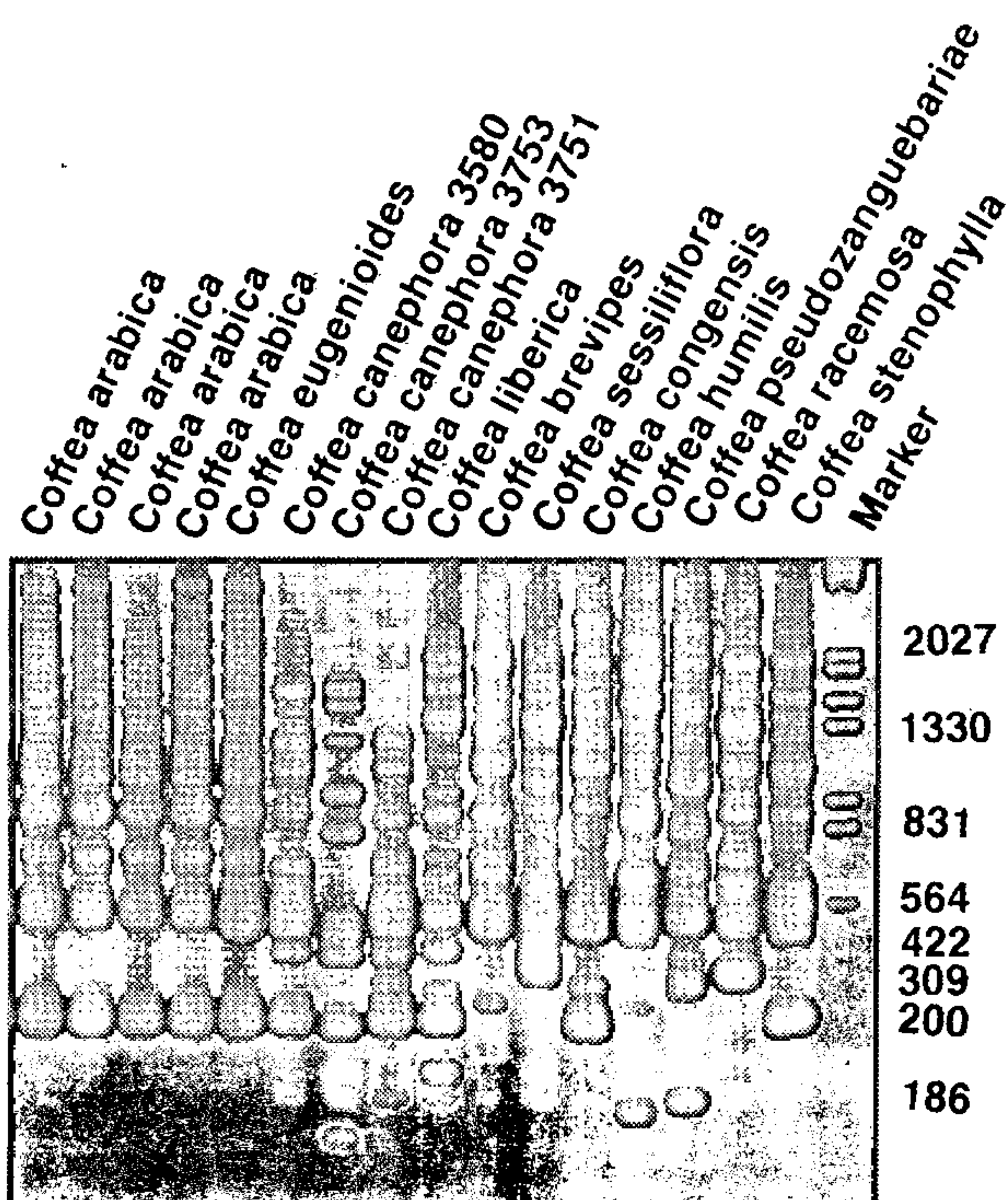
RESULTADOS

Los 15 primers arbitrarios seleccionados detectaron amplio polimorfismo, con un promedio de 4.3 bandas polimórficas por loci. Un total de 65 productos polimórficos fueron calificados para el análisis. Ejemplo de los RAPDs detectados con SC10-97 se muestran en la figura 1.

La amplificación por PCR de las secuencias del ADN del cloroplasto no revelaron polimorfismo. Sin embargo, polimorfismo fue revelado en dos de los productos del cloroplasto, después de su digestión con las enzimas de restricción RsaI y MboI (Figura 2a y 2b). Pudo observarse que *C. arabica*, *C. eugenoides*, *C. humilis* y *C. stenophylla* comparten un similar genotipo en el cloroplasto, *C. canephora*, *C. liberica*, *C. brevipes* y *C. congensis* un segundo genotipo y *C. pseudozanguebariae*, *C. sessiliflora* y *C. racemosa* un tercero. Los productos amplificados en el ADN mitocondrial fueron monomórficos en todas las especies examinadas.

Una matriz de similaridad basada en la frecuencia de productos amplificados compartidos [Nei y Li, 1979], usando sólo la variable de productos RAPD y polimorfismos en el ADN del cloroplasto es observado en el cuadro 3. Para las especies representadas por

más de una accesión, los cálculos fueron basados sobre la frecuencia de productos compartidos. Un número de productos RAPD fueron únicos y podrían considerarse indicativos para una accesión dada. Para las cuatro especies representadas por más de una accesión, la diagonal indicada provee un estimador de similitud entre materiales de la misma especie. La proporción de fragmentos compartidos difirió de 0.812 a 1.000



SC10- 97

Figura 1. Productos amplificados RAPD de 18 genotipos de 11 especies del género *Coffea* con el primer SC10-97.

Un dendrograma mostrando las relaciones entre accesiones es observado en figura 3a. Se observa una clara separación de *C. racemosa*, *C. sesiliflora* y *C. pseudozanguebariae* de las otras especies con 55% de diferencia en los productos. Además, mientras estas especies forman un grupo diferente de las otras especies, ellos también presentan diferencias a nivel de subgrupo, pudiéndose cada una de ellas diferen-

Coffea arabica
Coffea arabica
Coffea arabica
Coffea arabica
Coffea eugenoides
Coffea eugenoides
Coffea canephora 3751
Coffea liberica
Coffea brevipes
Coffea sessiliflora
Coffea congensis
Coffea humilis
Coffea pseudozanguebariae
Coffea racemosa
Coffea stenophylla

a



b



Figura 2. Productos amplificados generados en 18 accesiones de café (11 especies), usando iniciadores específicos para regiones de ADN del cloroplasto. A) CH-C y CH-D y enzima de restricción RSAI b) CH-E y CH-F y enzima de restricción MBOI.

Cuadro 4

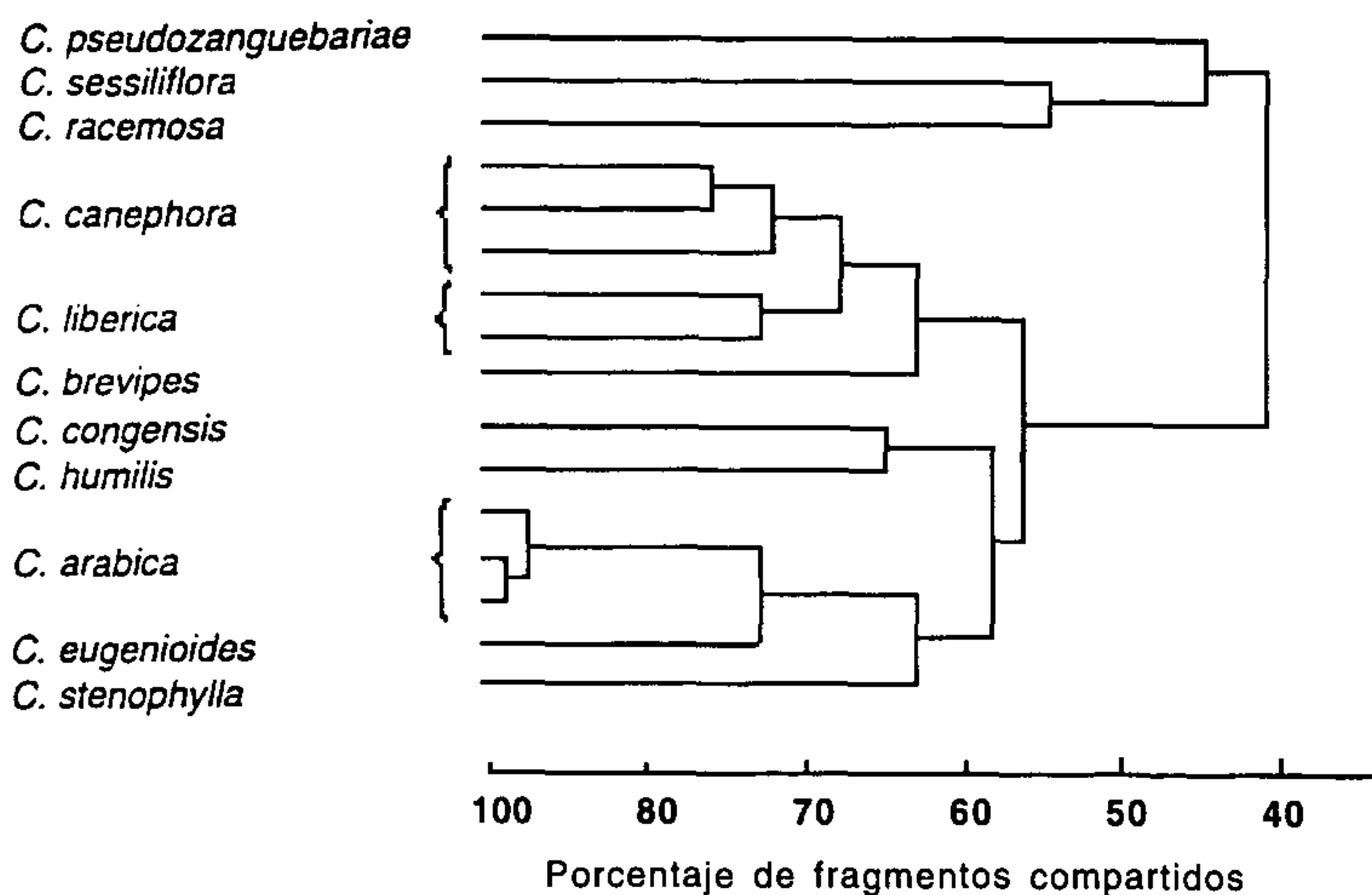
MATRIZ DE SIMILARIDAD BASADA EN EL NÚMERO DE PRODUCTOS COMPRTIDOS.

El promedio de similaridad dentro de cada especie está representado por la diagonal principal.

Los otros valores estan basados en la media de todas las accesiones dentro de las especies.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1. <i>C. stenophylla</i>	n/a										
2. <i>C. racemosa</i>	0.528	n/a									
3. <i>C. pseudozanguebariae</i>	0.449	0.524	n/a								
4. <i>C. humilis</i>	0.667	0.511	0.465	n/a							
5. <i>C. congensis</i>	0.525	0.296	0.360	0.618	n/a						
6. <i>C. sessiliflora</i>	0.509	0.625	0.545	0.531	0.464	n/a					
7. <i>C. brevipes</i>	0.593	0.490	0.383	0.694	0.571	0.500	n/a				
8. <i>C. liberica</i>	0.605	0.366	0.337	0.632	0.687	0.504	0.756	0.812			
9. <i>C. canephora</i>	0.592	0.380	0.315	0.572	0.737	0.488	0.699	0.764	0.820		
10. <i>C. eugenoides</i>	0.710	0.571	0.462	0.643	0.581	0.483	0.678	0.617	0.644	1.000	
11. <i>C. arabica</i>	0.714	0.496	0.387	0.628	0.622	0.577	0.664	0.701	0.723	0.819	0.986

a.



b.

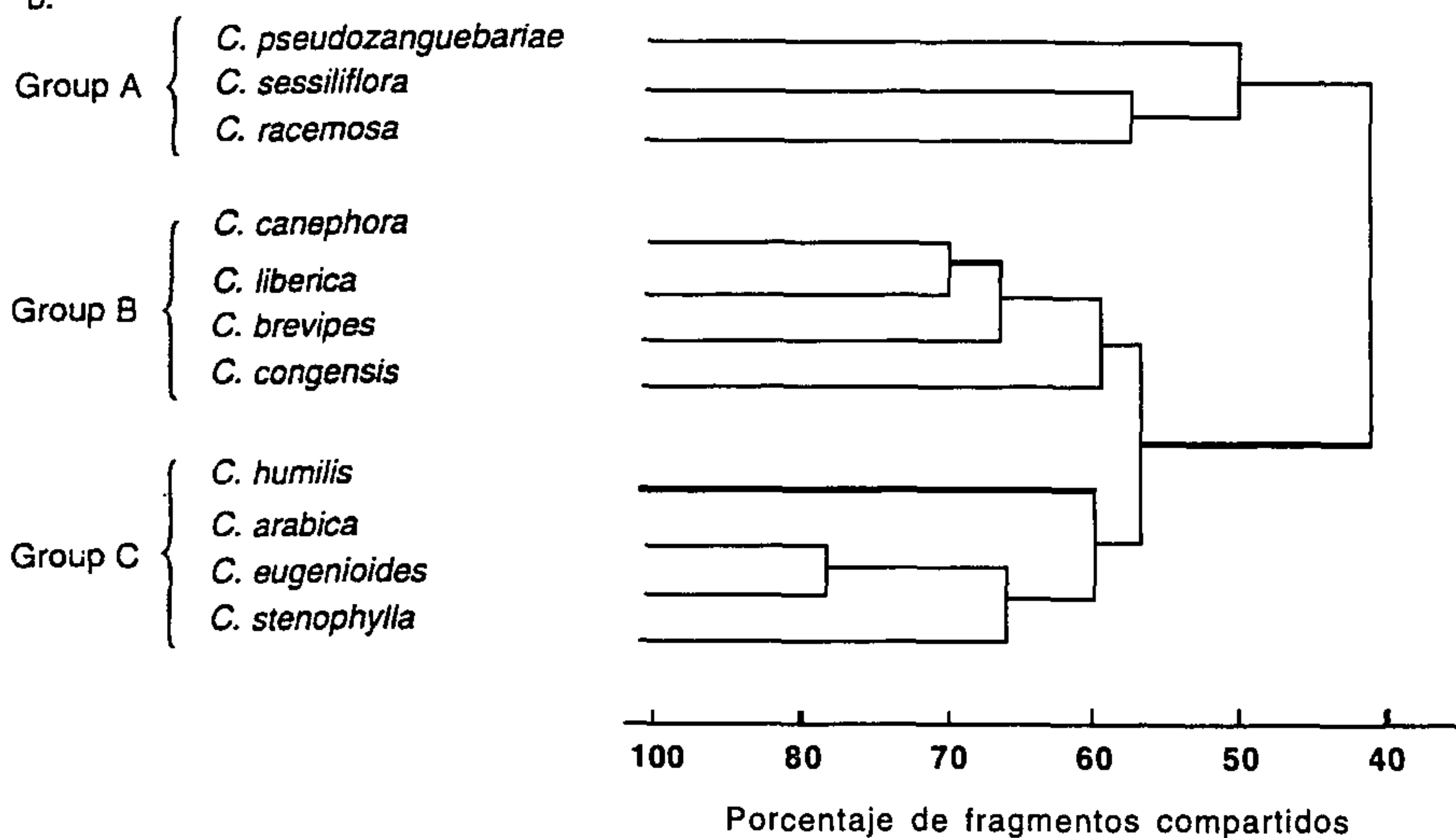


Figura 3. Dendrograma de 18 accesiones de 11 especies del género *Coffea* utilizando datos derivados de marcadores RAPD y STS. a) Basado en análisis cluster individuales. b) Basado en análisis del promedio de grupos.

ciarse claramente. De las especies remanentes, *C. canephora*, *C. liberica* y *C. arabica* muestran variación interespecífica, lo cual es más pronunciado en las especies diploides. La similitud entre *C. arabica* y *C. eugenioides* es de particular relevancia, las cuales comparten el 80% de sus productos.

Para simplificar la representación de las relaciones entre accesiones de individuos, un segundo dendrograma muestra relaciones entre especies (Figura 3b). El dendrograma es generado por promedios de grupo cluster donde la similaridad entre dos grupos está definido como el promedio de similitud de todos los loci calificados en cada grupo. Las mismas asociaciones generales fueron observadas, permitiendo que las especies sean separadas en tres grupos (A, B, y C en la figura).

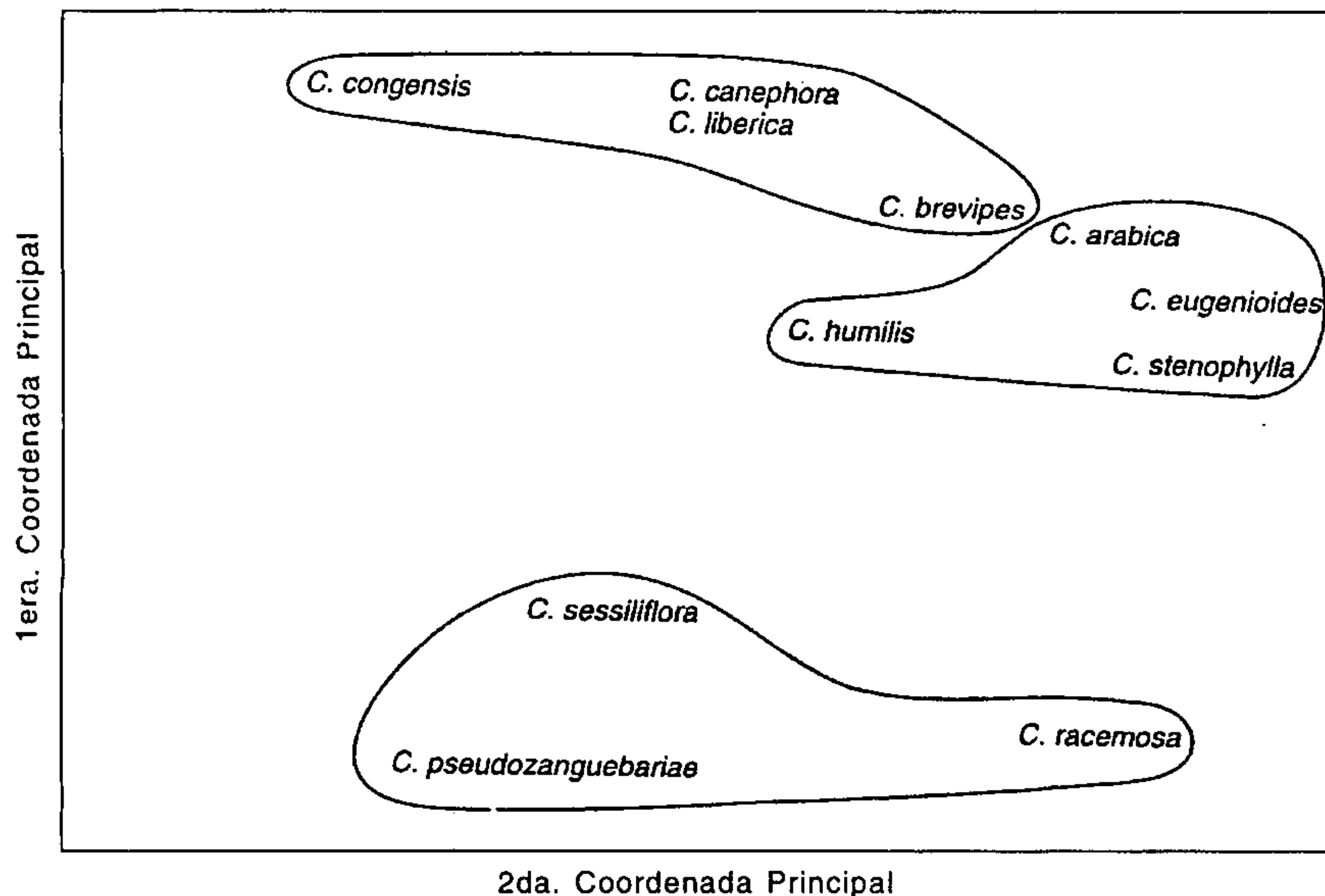


Figura 4. Análisis de componentes principales de 11 especies del género *Coffea*, utilizando los datos derivados de marcadores RAPD y STS.

Con el propósito de confirmar los resultados del análisis cluster, análisis de componentes principales fueron realizados, analizando los datos de fragmentos compartidos. Los primeros dos componentes principales del análisis determinan el 43% de la variación total. Similares asociaciones fueron nuevamente observadas. Estos resultados muestran también que *C. arabica* está más cercanamente relacionada con *E. eugenioides*, *C. stenophylla* y *C. brevipes*.

DISCUSIÓN

La relación genética en 11 especies del género Coffea que son actualmente importantes en programas de mejoramiento del café fueron ensayadas sobre las bases de RAPD y STS en ADN de organelos (cloroplasto y mitocondria).

La relación genética en 11 especies del género *Coffea* que son actualmente importantes en programas de mejoramiento del café fueron ensayadas sobre las bases de RAPD y STS en ADN de organelos (cloroplasto y mitocondria). Polimorfismo intra e inter específico fue detectado con marcadores RAPD (Fig. 1). Los marcadores en el cloroplasto detectaron sólo polimorfismo interespecífico. (Figs. 2a y 2b). El nivel reducido de polimorfismo observado en el tetraploide *C. arabica* en comparación con el mostrado por *C. canephora* está en acuerdo con aquel encontrado usando Enzimas y RAPDs [Moreno, 1989, Orozco Castillo *et al.*, 1994].

La variación genética restringida en *C. arabica* puede reflejar la naturaleza autógama de esta especie con tendencia a la homocigosis, comparada con la naturaleza alógama de las especies diploides, que manifiesta una polinización cruzada. Alternativamente, podría indicar también la reducida base genética de *C. arabica*, o pérdida de su diversidad genética durante su origen [Hamilton 1974].

Hay una relación cercana entre los dendrogramas

derivados en este estudio, basados en marcadores de ADN nuclear y del cloroplasto, con las clásicas relaciones taxonómicas basadas en características morfológicas. [Charrier y Berthaud, 1985]. De especial relevancia es la formación de tres grupos (Fig. 3 y 4), lo cual de manera general corresponde a la distribución geográfica de estas especies. El grupo A está conformado por *C. racemosa*, *C. sessiliflora* y *C. pseudozanguebariae*, originados del Sur-Este de África y forma un grupo distinto con 40% de los fragmentos compartidos (Fig. 3b). Aquellos formando el grupo B, esto es, *C. congensis*, *C. brevipes*, *C. liberica* y *C. canephora*, son todas de África central y tienen 60% de los fragmentos compartidos. Las otras especies (Grupo C), se originan del oeste y el lado Atlántico de África Central. Los mismos resultados son observados en el análisis de componentes principales. Los fenotipos basados en el ADN del cloroplasto son también diferentes entre estos mismos grupos. Esta correspondencia sugiere que los factores geográficos son importantes en el proceso de especiación. Estos resultados sugieren un origen común de las especies en cada subgrupo.

Es interesante observar que el dendrograma y los análisis de coordenadas principales reflejan una clara separación de *C. racemosa*, *C. pseudozanguebariae* y *C. sessiliflora* de las otras especies. La separación de estas especies en este estudio, es similar a lo mostrado por Louarn [1993], quien encontró que estas especies son interfértiles entre ellas, pero son incompatibles en cruces interespecíficos con otras especies, reflejando una fuerte barrera de fertilidad. Cros *et al.* [1993] sugiere que la incompatibilidad de las primeras especies en cruces con otras especies podría estar relacionado con las diferencia en el

Es interesante observar que el dendrograma y los análisis de coordenadas principales reflejan una clara separación de C. racemosa, C. pseudozanguebariae y C. sessiliflora de las otras especies.

tamaño del genoma, ya que estas especies tienen el más bajo contenido de ADN por núcleo (alrededor de 1 pg). Similar separación de estas especies fue propuesta por Berthaud y Charrier [1988], sobre bases morfológicas, citológicas y distribución geográfica de las especies.

El nivel de similaridad entre *C. arabica* y *C. eugenoides* (80% de productos compartidos, (Figura 3b) es de particular relevancia. Berthou *et al.* [1983] propone que *C. arabica* fue derivado de un material relacionado cercanamente con *C. eugenoides*. Los resultados que se presentan en este estudio no entran en conflicto con esta teoría, y tanto los datos del análisis nuclear como del cloroplasto indican que *C. eugenoides* es la especie más cercanamente relacionada con la especie diploide *C. arabica*. Conjuntamente con *C. humilis* y *C. stenophylla*, estas especies comparten los mismos productos, lo cual sugiere que una de estas especies podría ser el progenitor materno de *C. arabica*.

En términos prácticos, estos resultados proveen un mejor entendimiento de las relaciones entre especies dentro del género *Coffea* y puede facilitar el desarrollo de germoplasma de café mejorado basado en la transferencia de genes. Diferentes procesos para la creación de anfidiplóides sintéticos han sido descritos para café, y los datos presentados en este estudio podrían ayudar a la identificación de la fuente genética más apropiada para su inclusión en dichos programas.

CONCLUSIONES

RAPD y STS determinaron claramente diversidad genética a nivel molecular en especies del género *Coffea*.

Los resultados derivados de RAPD y STS son consistentes con los estudios taxonómicos realizados a nivel morfológico entre especies del género *Coffea* y reflejan el origen y distribución geográfica de las especies.

El análisis del ADN de núcleo y cloroplasto sugieren que *C. eugenioides* conjuntamente con *C. humilis* y *C. stenophylla* podrían ser el progenitor materno de *C. arabica*.

Los datos obtenidos en este estudio pueden coadyuvar a la identificación del germoplasma más apropiado para su incorporación en programas de mejoramiento genético del café.

Los datos obtenidos en este estudio pueden coadyuvar a la identificación del germoplasma más apropiado para su incorporación en programas de mejoramiento genético del café.

BIBLIOGRAFÍA

BERTHAUD J. 1986. Les ressources génétiques pour l'amélioration des cafeiers africains diploïdes: évaluation de la richesse génétique des populations sylvestres et de ses mécanismes organisateurs. Consequences pour l'application. Travaux et Documents de l'Orstom, 188, 372 p.

BERTHAUD J. CHARRIER, A. 1988. Genetic resources of *Coffea*. In: Clarke, R.J. & Macre, R. (eds) Coffee Vol. 4 Agronomy. Elsevier Applied Science. London.

- BERTHOU R. MATHIEU C. Vedel F. 1983. Chloroplast and mitochondrial DNA variation as indicators of phylogenetic relationships in the genus *Coffea* L. Theor and Appl Genetics, 65, 77-84.
- CARVALHO A. 1985. Breeding of Arabica for productivity and quality. In: Clifford, M.N. & Wilson, K.C. (eds) Coffee: Botany, Biochemistry and Production of Beans and Beverage. Croom Held Ltd Publishers, Beckenham, UK.
- CARVALHO A. MÓNACO L.C. 1968. Relaciones genéticas de especies seleccionadas de *Coffea*. Café, 4, 3-19.
- CHARRIER A. 1977. La structure génétique du genre *Coffea*, ses consequences pour l'amélioration des cafeiers cultives. 8th Conference of ASIC, Abidjan, Ivory Coast. 407-410.
- CHARRIER A. 1978. La structure génétique des cafeiers spontanés de la région malgache *Mascarocoffea*. Leurs relations avec les cafeiers d'origine africaine *Eucoffea*. Memoirs ORSTOM, 87, 223 p.
- CHARRIER A. BERTHAUD J. 1985. Botanical classification of coffee. In: Clifford, M.N & Wilson, K.C. (eds) Coffee: Botany, Biochemistry and Production of Beans and Beverage. Croom Held Ltd Publishers, Beckenham, UK.
- CHEVALIER A. 1947. Les cafeiers du globe. Systematique des cafeiers et des faux-cafeiers. Encyclopedie Biologique XXVII, Fas. III, P. Lechevalier, Paris 356 p.
- CHARRIER A. BERTHAUD J. 1985. Botanical classification of coffee. In: Clifford MN, Wilson KC (eds) Coffee: Botany, biochemistry and production of beans and beverage. Croom Held Ltd Publishers, Beckenham, UK, pp. 13-47.
- CROS J. LASHERMES P. MARMEY P. ANTHONY F. HAMONS S. CHARRIER A. 1993. Molecular analysis of genetic diversity and

phylogenetic relationships in *Coffea*. In: Proceedings of 15th International Conference on Coffee Science (ASIC), Montpellier, pp. 41-46.

DIGBY, PGN, KEMPTON RA. 1987. Multivariate analysis of ecological communities. Chapman and Hall, London.

GRASSIAS M. KAMMACHER P. 1975. Observations sur la conjugaison chromosomique de *Coffea arabica* L. Café, Cacao, The, 19, 177-190.

HAMILTON A. C. 1974. In: Lind, E.M. & Morrison, M.E.S. (eds). East African Vegetation. Longman, London, 1974. 188-209.

HANDRYS H, BALICK M, SCHIERWATER B. 1992. Applications of random amplified polymorphic DNA (RAPD) in molecular ecology. Mol Ecol. 1: 35-63.

KEMPTON R, MCNICOL J. 1990. Graphical methods for multivariate data. Scottish Agricultural Statistics Service.

LEROY, J.F. 1980. Evolution et taxogenese chez les cafeiers. Hypothèse sur leur origine. Comtes Rendus de l'Academie des Sciences, Paris, 291, 593-596.

LOUARN J. 1993. Sructure genetique des cafeiers africains diploides basée sur la fertilité des hybrides interspecifiques. Communication au XV congress de l'ASIC, Montpellier, France.

MORENO G. 1989 Etude dupolymorphisme de l'hybride de Timor en vue de l'amelioration du cafeier arabica. These de Docteur-ingenieur, ENSA, Montpellier, France, 127 p.

NEI M, LI W-H. 1979. Mathematical model for studying genetical variation in terms of restriction endonucleases. Proc Natl Acad Sci USA. 74: 5267-5273.

OROZCO CASTILLO CA, CHALMERS KJ, WAUGH R, POWELL W (1994) Detection of genetic diversity and gene

introgression using RAPD markers. Theor Appl Genet 87: 934-940.

OROZCO CASTILLO, CA 1995. Molecular diversity and Evolutionary Studies in the Genus *Coffea*. PhD Thesis. University of Edinburgh, Edinburgh, United Kingdom. 214 pp.

POWELL W, PHILLIPS MS, MCNICOL JW, WAUGH R. 1991. The use of DNA markers to estimate the extent and nature of genetic variability in *Solanum tuberosum* cultivars. Ann Appl Biol. 118: 423-432.

VOSEN HAM VAN DER. 1985. Coffee selection and breeding. In: Clifford MN, Wilson KC (eds) Coffee: botany, biochemistry and production of beans and beverage. Crom Held, Beckenham, UK. pp. 48-96.

VOSEN HAM VAN DER, WALYARO DJ. 1980. Breeding for resistance to coffee berry disease in *Coffea arabica* L. II. Inheritance of the resistance, Euphytica. 29: 777-791.

WELSH J, MCCLELLAND M. 1990. Fingerprinting genomes using PCR with arbitrary primers. Nucleic Acids Res. 18: 7213-7218.

WILLIAMS JGK, KUBELIK AR, LIVAK KJ, RAFALSKI JA, TINGEY SV. 1990. DNA polymorphisms amplified by arbitrary primers are useful as genetic markers. Nucleic Acids Res. 18: 6531-6535.

HIDROGEOLOGÍA DE LA CUENCA DEL RÍO ITZAPA, DEPARTAMENTO DE CHIMALTENANGO, GUATEMALA

Isaac Rodolfo Herrera Ibáñez



Resumen

Este estudio condensa información sobre la geología, hidrología, aguas subterráneas y la hidrogeoquímica de la cuenca del río Itzapa en el Departamento de Chimaltenango del altiplano occidental de Guatemala, con el objeto de caracterizar el acuífero que servirá para la formulación de un plan de manejo de las aguas subterráneas de San Andrés Itzapa.

Las principales unidades geológicas del área, pertenecen al grupo volcánico del Terciario y consta de materiales del Mioceno al Plioceno, estando constituidas por andesitas y flujos riolíticos con obsidiana, las cuales están altamente fracturadas y forman el acuífero local. Las rocas volcánicas del Cuaternario comprenden el Pleistoceno y Holoceno compuestas de rocas volcánicas (dacitas y andesitas), y flujos piroclásticos de pómez y diamictones.

En la cuenca existe una distribución espacial de la recarga al acuífero, distinguiéndose tres áreas de recarga: 1) la parte baja de la cuenca donde se recarga un volumen anual de agua de $3.87 \times 10^6 \text{ m}^3$; 2) la parte alta de la cuenca donde se recargan anualmente $6.18 \times 10^6 \text{ m}^3$; y 3) la parte noroeste fuera de la cuenca que da una recarga lateral anual de $0.89 \times 10^6 \text{ m}^3$. El volumen total de recarga anual se estima de 10,945,000 metros cúbicos.

El acuífero es extenso y profundo, por lo que sus límites corresponden en gran medida con los de la cuenca hidrográfica del río Guacalate, localizándose en rocas volcánicas

fracturadas con espesores saturados de por lo menos 80 metros. El acuífero es libre o freático, con líneas de flujo de oeste a este y fluctuaciones de los niveles estáticos entre 0.15 a 3.35 m.

En la cuenca existe un alto potencial del recurso hídrico subterráneo, ya que se tiene una recarga de 10,945,000 m³/año y una producción actual de 1,912,000 m³/año, con un balance positivo de 9.03 millones de metros cúbicos por año. Por lo que la explotación actual representa sólo el 21% del recurso temporal y el excedente es de un 79%.

Por hidrogeoquímica las aguas subterráneas son del tipo bicarbonatadas-cálcico-magnésicas, siendo aguas jóvenes con poca evolución química y muy diluidas. Además, estas aguas no presentan contaminantes inorgánicos con concentraciones sobre las normas de potabilidad, por lo que son aptas para consumo humano y para riego.

Los análisis isotópicos de ¹⁸O y ²H, permitieron confirmar de forma cualitativa, que las áreas de recarga, se dan tanto en la parte alta como en la parte baja de la cuenca por efecto de la lluvia, ya sus concentraciones son muy similares a las del agua de precipitación pluvial.

INTRODUCCIÓN

La República de Guatemala tiene una extensión territorial de 108.9 mil kilómetros cuadrados y su población de acuerdo al Instituto Nacional de Estadística [1995] es de 10,621,226 habitantes, siendo el 60% de ella población rural, la cual se ubica principalmente en el altiplano del país.

Guatemala, se puede dividir hidrológicamente en tres regiones principales: i) Vertiente del Pacífico, ii) Vertiente del Atlántico o Mar de las Antillas y iii) Vertiente del Golfo de México, subdividiéndose cada una de ellas en cuencas. Una cuenca hidrográfica es un área que comprende una depresión natural o valle de fondo cóncavo, separada de otras, por divisorias de aguas y formada por un conjunto de pendientes inclinadas hacia un mismo curso de circulación de

agua superficial, en el que vierten sus aguas ríos y quebradas [Herrera, 1995].

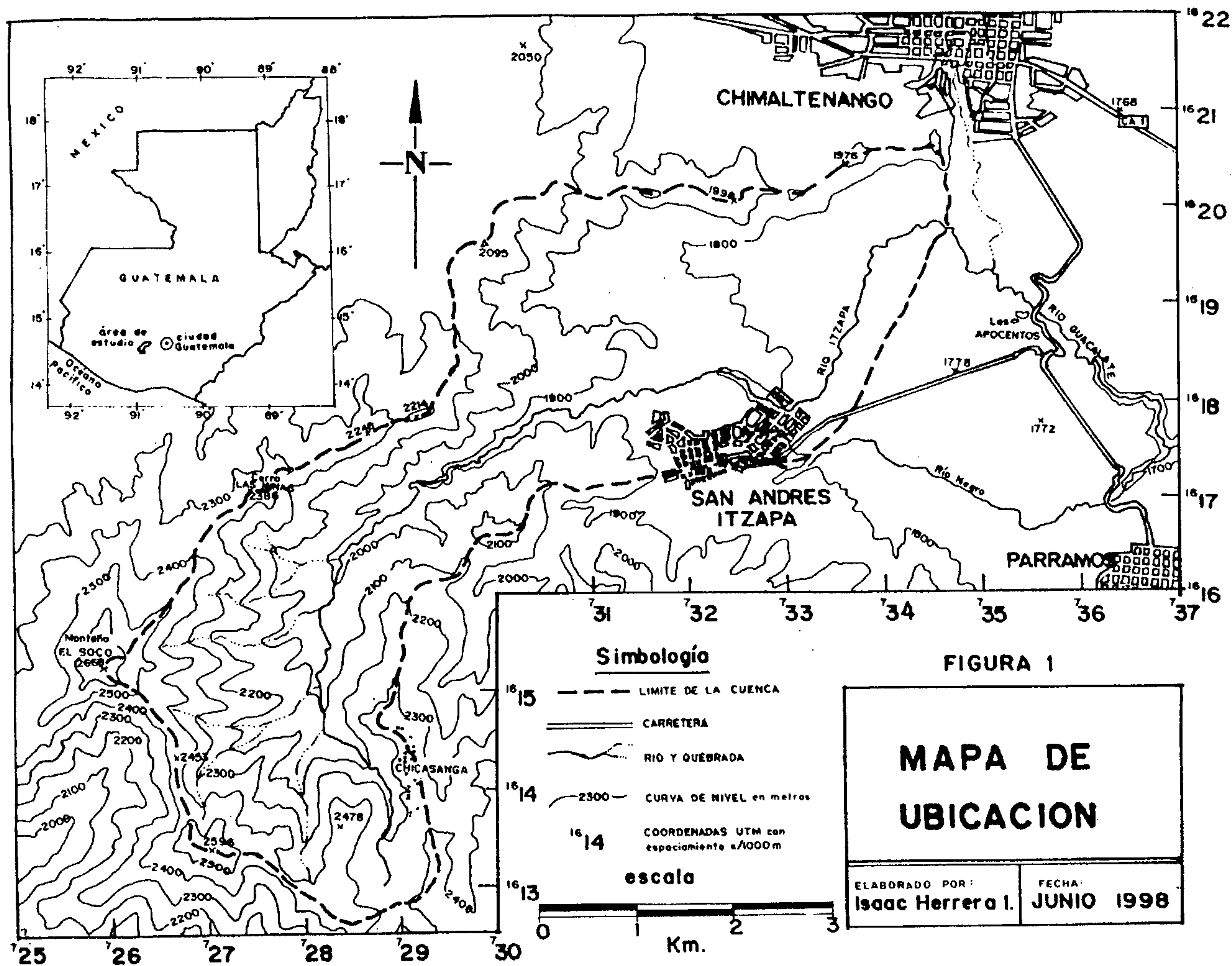
La cuenca del río Achiguate, que drena al Océano Pacífico, es un área demasiado amplia que posee una extensión de 1,291 kilómetros cuadrados. Su zona alta comprende parte del altiplano central y es donde se encuentra la subcuenca del río Itzapa. En esta cuenca se asienta el poblado de San Andrés Itzapa, representando una zona rural típica y de suma importancia para la región desde el punto de vista social, económico y cultural.

La cuenca hidrológica del río Itzapa está ubicada en su totalidad en la jurisdicción del Municipio de San Andrés Itzapa al suroeste de la cabecera del Departamento de Chimaltenango, que se localiza al oeste de la Ciudad de Guatemala. La población total dentro de la cuenca es de aproximadamente 8,100 habitantes, dentro de la cual existe en la cabecera municipal en la parte baja 7,760 habitantes, de los cuales el 79.78% son del grupo étnico Maya Cakchiquel, los que son bilingües (lengua nativa y castellano); mientras que en la Aldea Chicazanga en parte alta, cuenta con 340 habitantes, todos del grupo Maya Cakchiquel, en su mayoría también bilingües [IIA-DIGI, 1996].

La cuenca tiene un área de 26.71 km², está comprendida entre los paralelos 14° 34' 37" y 14° 38' 56" de latitud norte y los meridianos 90° 49' 21" y 90° 54' 15" de longitud oeste. Se encuentra entre las coordenadas de 1,612,600 metros a 1,620,625 metros Norte y de 725,900 metros a 734,650 metros Oeste, en el sistema UTM (Universal Transversa de Mercator) (figura 1).

En Guatemala, el conocimiento de cuencas hidrográficas en lo relativo a técnicas de estudio, planifica-

La cuenca del río Achiguate, que drena al Océano Pacífico, es un área demasiado amplia que posee una extensión de 1,291 kilómetros cuadrados.



ción y manejo es relativamente escaso, y por lo tanto, se ha hecho conveniente seleccionar subcuencas, para realizar investigaciones que puedan ser concentradas en zonas más pequeñas, las cuales permitan generar estudios que puedan ser llevados a cabo en corto y mediano tiempo, para que las informaciones que se obtengan puedan ser utilizadas en un plan de manejo integral de forma rápida y efectiva [Nittler y Barahona, 1993].

Actualmente en la cuenca del río Itzapa, existe muy poco aprovechamiento del agua del río, ofreciendo éste posibilidades limitadas en cuanto a cantidad y calidad de agua (ya que se vierten algunas aguas negras y de drenaje del pueblo), pero en cambio, existen condiciones favorables para explotar las aguas subterráneas, por lo que este estudio permitió conocer las cantidades disponibles y proponer algunas estrategias para la explotación racional del acuífero, ya que actualmente éste es poco aprovechado por los habitantes sobre la cuenca, que aprovechan algunas fuentes como manantiales, pero de una forma empírica y desordenada.

El estudio está dirigido a ayudar principalmente a los pobladores de la cuenca, en la explotación del agua subterránea para abastecimiento público y para riego; y espera beneficiar sobre todo a los pequeños y medianos agricultores de la cuenca, que utilizan el agua de lluvia para cultivos estacionales (maíz y frijol), estando limitados a la producción de invierno (mayo a octubre).

Por lo anterior, esta investigación tuvo como objetivo, estudiar en forma general la hidrogeología de la Cuenca del río Itzapa, para generar información del recurso hídrico, que servirá en la formulación

El estudio está dirigido a ayudar principalmente a los pobladores de la cuenca, en la explotación del agua subterránea para abastecimiento público y para riego.

de un plan de manejo de los recursos naturales de la cuenca.

Además, se propuso de forma específica: i) Estudiar la geología de la cuenca; ii) Caracterizar y evaluar los factores meteorológicos, para estimar la recarga del acuífero; iii) Determinar las unidades hidrogeológicas de la zona, la extensión del acuífero y sus parámetros hidrogeológicos; iv) Conocer la calidad del agua superficial y subterránea desde el punto de vista físico-químico para uso agrícola y consumo humano.

METODOLOGÍA

La metodología utilizada en el estudio, se dividió en tres fases: fase preliminar, fase de campo, y fase de análisis y elaboración del documento final.

La metodología utilizada en el estudio, se dividió en tres fases: fase preliminar, fase de campo, y fase de análisis y elaboración del documento final.

Fase preliminar

Esta primera fase consistió primeramente en la recopilación de información, como tesis, informes y adquisición de mapas a escala 1:50000 de los temas siguientes: topografía, geología, isoyetas, clasificación de suelos, uso potencial y uso actual de la tierra.

Recopilación y ordenamiento de la información hidrometeorológica de las estaciones dentro y cercanas a la cuenca, tabulando principalmente los datos diarios y mensuales de precipitación pluvial, evaporación de tanque y caudales del río.

Se realizó el inventario de pozos de agua de la zona, con información sobre su localización, profundidad de perforación o excavación, niveles de agua

(estático y dinámico), caudal promedio, diseño de pozo, longitud de rejilla, diámetro de encamisado, la descripción litológica de las formaciones geológicas encontradas y datos de pruebas de bombeo.

Fase de campo

En esta fase se realizaron dos campañas de campo, la primera de un mes (10 de julio a 10 de agosto de 1997) que comprendió un reconocimiento general y la segunda de tres meses y medio (diciembre de 1997 a marzo de 1998). Esta fase se dividió en tres áreas de trabajo: Geología, Hidrología y Aguas Subterráneas.

GEOLOGÍA

- i) La fotogeología de la cuenca y lugares aledaños, donde se definieron algunos contactos geológicos entre unidades superficiales y lineamientos de fallas.
- ii) El mapeo geológico del área a escala 1:50000, por medio de recorridos de caminos, veredas, ríos y quebradas, con el muestreo de las principales unidades de rocas.
- iii) El levantamiento de columnas litológicas en cortes de taludes de ríos y en pozos perforados dentro y fuera de la cuenca para su correlación estratigráfica.
- iv) La elaboración de perfiles geológicos de acuerdo a la información de afloramientos de rocas y de litología de pozos.

HIDROLOGÍA

- i) Revisión y calibración de los aparatos de las estaciones meteorológicas: pluviómetro, pluviógrafo, termómetro (de máxima y mínima) y tanque de evaporación.
- ii) Realización de aforos diferenciales del río, en diferentes meses para determinar las pérdidas y ganancias de las aguas del río al acuífero. El método utilizado fue el de Sección - Velocidad [Herrera, 1995], determinando la velocidad del río por medio del molinete.
- iii) Pruebas de infiltración en diferentes tipos de suelos para la determinación de sus capacidades de infiltración. El método utilizado fue el de Porchet [Custodio y Llamas, 1983], que consiste en excavar en el suelo un hoyo cilíndrico de radio "R" y se llena con agua hasta una altura "h" e inmediatamente se empieza a tomar un tiempo suficientemente pequeño (dt) para que pueda suponerse constante la capacidad de infiltración (f). Así pues, para determinar f, basta medir pares de valores (h_1, t_1) (h_2, t_2) , de forma que t_2 y t_1 no difieran demasiado y se entre con ellos en la expresión:

$$f = \frac{R}{2(t_2 - t_1)} \cdot \ln \frac{2h_1 + R}{2h_2 + R}$$

- iv) Muestreo de suelos para el cálculo de la densidad en el laboratorio y para la determinación de las constantes de humedad (capacidad de campo y punto de marchitez).

AGUAS SUBTERRÁNEAS

- i) Determinación y descripción de las unidades hidrogeológicas del área, de acuerdo a la identificación de afloramientos de roca de manantiales, así como, por litología de pozos.
- ii) Ubicación exacta de los pozos por coordenadas UTM, determinación de la altitud y medición de los niveles estáticos.
- iii) Realización de pruebas de bombeo en pozos dentro y alrededor de la cuenca, tomando en cuenta los caudales de bombeo, los abatimientos y el tiempo de los mismos.
- iv) Campaña de muestreo de aguas de pozos, manantiales y río, para su análisis químico, bacteriológico e isotópico, con la determinación en el campo de temperatura, pH y conductividad eléctrica.

Fase de análisis y elaboración del documento final

En esta fase se analizó en gabinete la información existente, definiendo las metodologías específicas para la obtención de los objetivos propuestos. Los modelos de aguas subterráneas utilizados fueron principalmente visuales (mapas, secciones y redes de flujo) y matemáticos (soluciones gráficas y numéricas).

- i) Corrección y elaboración de mapas a escala 1:50,000 y de perfiles hidrogeológicos.
- ii) Clasificación y determinación de la composición mineralógica de las rocas, caracterizando su mineralogía por medio del análisis petrográfico.
- iii) Selección de los datos hidrometeorológicos y análisis de los mismos. Cálculo del balance hídrico

diario y mensual, con la determinación de la recarga por medio del Método de Penman-Gridley.

- iv) Cálculo de parámetros hidrogeológicos (transmisividad y coeficiente de almacenamiento) para la definición del acuífero, por los métodos de Jacob y de Theis.
- v) Confección del mapa de isofreáticas a escala 1:50,000 con las direcciones de flujo.
- vi) Revisión de los análisis de aguas y clasificación de la mismas, de acuerdo a los diagramas de Piper y Wilcox [Sanders, 1998], y determinación de la calidad del agua para uso de agua potable y para riego. Interpretación de los resultados de isótopos (^2H y ^{18}O) para distinguir las zonas de recarga al acuífero.

El área de estudio se encuentra dentro de la cadena volcánica, también llamado "Cinturón Volcánico Central", por ser la unidad donde se ubican los principales centros eruptivos del Cuaternario.

RESULTADOS

Marco geomorfológico

El área de estudio se encuentra dentro de la cadena volcánica, también llamado "Cinturón Volcánico Central", por ser la unidad donde se ubican los principales centros eruptivos del Cuaternario. En esta región destacan los volcanes de Pacaya, Fuego, Acatenango (8 km al sur de la cuenca de estudio), Agua, la caldera volcánica de Amatitlán y el volcán de Santa María y Santiaguito, los que originan relieves accidentados, que marcan el borde sur del altiplano, alcanzando altitudes de hasta 4220 msnm.

En la cuenca del río Itzapa se distinguen dos

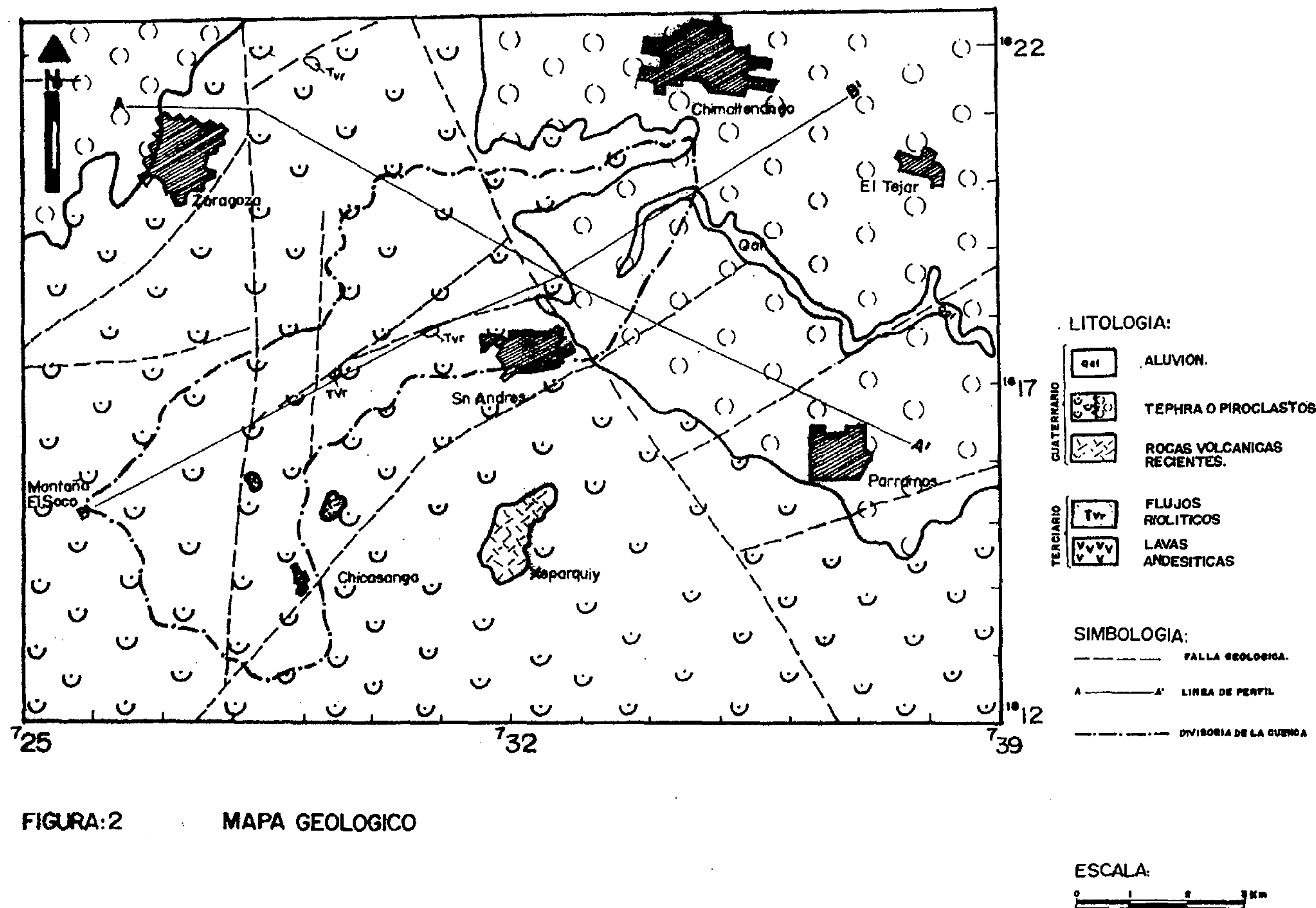
unidades geomorfológicas: las montañas volcánicas, y el valle tectónico del Guacalate.

La unidad de las Montañas Volcánicas representa aproximadamente el 85% de la cuenca y se encuentra constituida por flujos de lavas terciarias, cubiertos por espesas capas de depósitos piroclásticos cuaternarios. La geomorfología típica corresponde al área de los Cerros de Chicasanga, Montaña El Soco y Cerro Las Minas, con elevaciones entre 1800 a 2668 msnm, de relieve accidentado y con pendientes del 6 al 50%, orientadas hacia el noreste. Esta unidad se caracteriza por presentar suelos arenosos desarrollados a partir de los materiales piroclásticos, donde existe una permeabilidad alta que favorece la infiltración.

La segunda unidad forma una pequeña parte del Valle Tectónico del Guacalate y corresponde a la parte baja de la cuenca (al noreste), representando el 15% de la misma; constituida por tephra interestratificada con diamictones pomáceos y sedimentos fluvio-lacustres. Esta unidad geomorfológica se extiende hacia la parte oriental del área, a lo largo del valle del río Guacalate, con elevaciones entre 1700 a 1780 msnm, por lo que el relieve es suave y las pendientes son muy planas entre 0 a 4%. Los suelos desarrollados son de textura media (franco arcillo arenosos) y por la topografía plana presentan una infiltración alta.

Geología local

La geología del área de estudio se presenta en la figura 2 (Mapa Geológico) y consiste principalmente de rocas volcánicas terciarias y cuaternarias de interés hidrogeológico. Por lo que se separaron hidrogeológicamente en dos grupos: Grupo Volcánico Terciario,



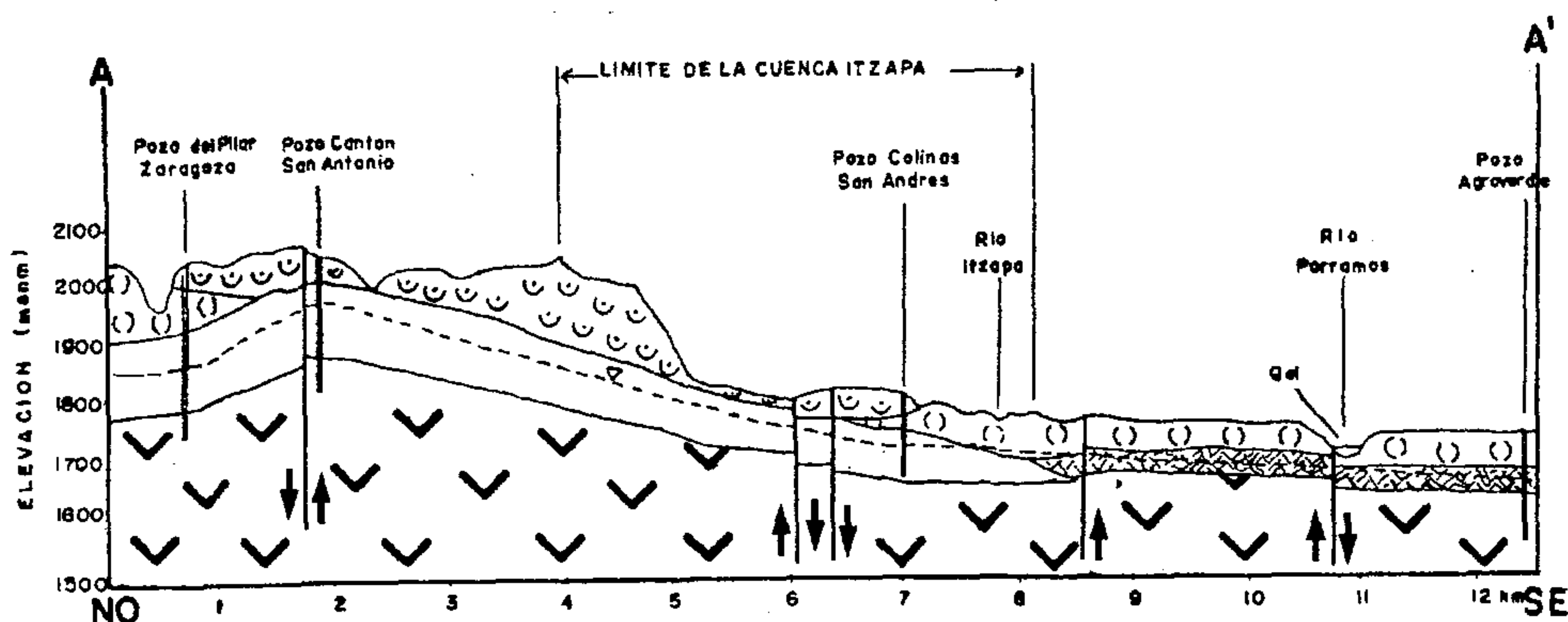


Figura 3. PERFIL HIDROGEOLOGICO A-A'

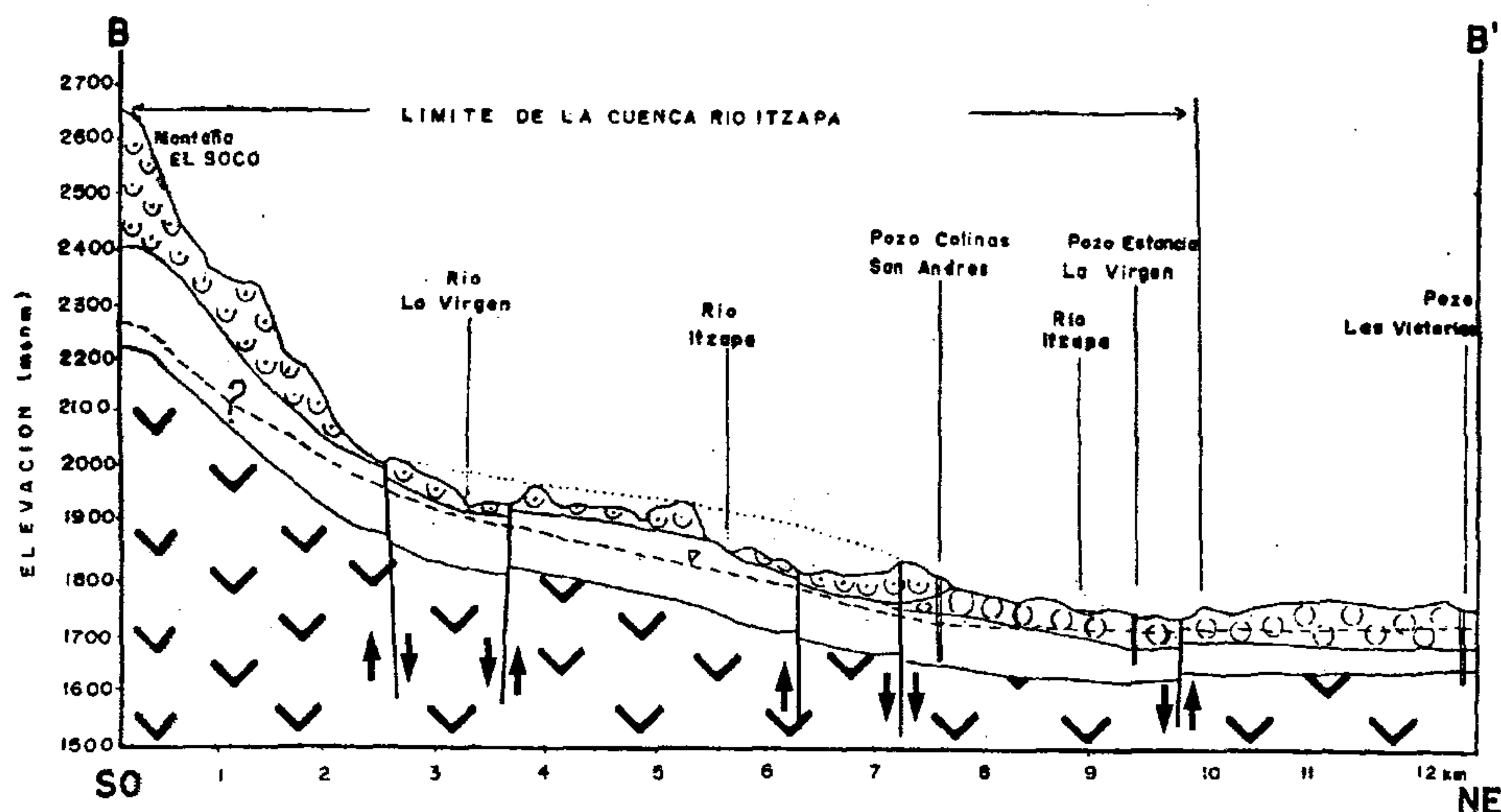
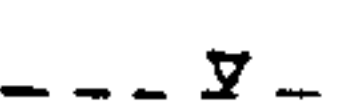


Figura 4. PERFIL HIDROGEOLOGICO B-B'

SIMBOLOGIA

- | | | | |
|---|--|---|-------------------|
|  | Tephra, pómez, ceniza, paleosuelos. |  | Flujos riolíticos |
|  | Tephra, interestratificada con diamictones y sedimentos fluvio-lacustres |  | Lavas andesíticas |
|  | Rocas volcánicas recientes |  | Falla geológica |
| | |  | Nivel Freático |

formado por rocas altamente fracturadas (andesitas y riolitas con obsidiana) que constituyen la zona saturada; y el Grupo Volcánico Cuaternario, formado por rocas volcánicas recientes (dacitas y andesitas) y flujos piroclásticos que representan en gran porcentaje la zona no saturada, como se observa en las figuras 3 y 4 (perfiles hidrogeológicos A-A' y B-B').

Estructura geológica

En la zona estudiada se localizan fallas gravitacionales abiertas con dirección N-S, NO-SE y NE-SO, como se muestra en la figura 2.

En la zona estudiada se localizan fallas gravitacionales abiertas con dirección N-S, NO-SE y NE-SO, como se muestra en la figura 2. Las fallas son casi paralelas y verticales con inclinaciones de 80° a 90°, es decir, de gran ángulo.

El valle del río Itzapa se formó como consecuencia de las fallas volcánicas con dirección N-S y NE-SO, que afectaron principalmente a las lavas del Terciario, por lo que el cauce del río es bastante rectilíneo y alineado con respecto a las fallas. Además, las fallas NO-SE y NE-SO formaron el límite del valle tectónico del Guacalate como se observa en el mapa geológico, concluyéndose que la cuenca hidrogeológica está controlada por procesos volcano-tectónicos. Por lo que los flujos de lava se encuentran parcialmente tectonizados, resultado del levantamiento de la región y específicamente por movimientos del sistema de fallas de los volcanes de Acatenango, Fuego y Agua que se localizan al sureste del área de estudio.

Hidrología superficial

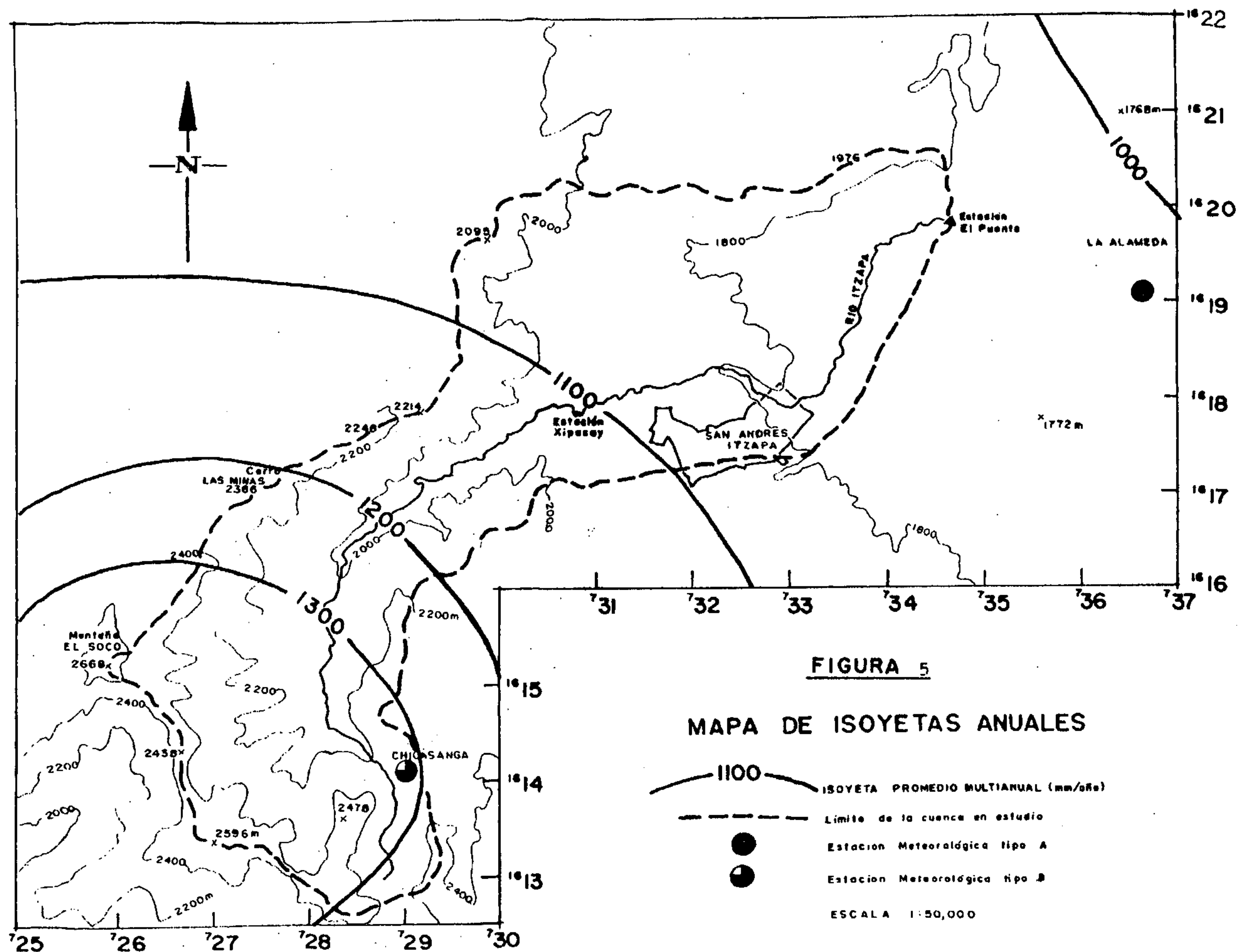
Los principales procesos de transferencia del ciclo hidrológico de la cuenca son: precipitación pluvial, infiltración, evapotranspiración y escorrentía superficial. Éstos son los elementos importantes en la estimación del balance hídrico de toda la cuenca para cuantificar la recarga al acuífero.

Precipitación pluvial

En la cuenca se identifican dos zonas climáticas bien marcadas, por lo que ésta se dividió en dos partes de acuerdo a los valores de isoyetas anuales: parte baja y parte alta (figura 5). Se analizaron los datos diarios de lluvia y evaporación de dos estaciones meteorológicas: primeramente la estación La Alameda que, es representativa de la parte baja de la cuenca donde se dan valores de lluvia anual de 1000 a 1100 mm; y la estación Chicasanga en la parte alta de la cuenca, que es representativa de las isoyetas de 1200 y 1300 mm anuales.

Cuadro 1
DATOS DE PRECIPITACIÓN PLUVIAL
MENSUAL (mm) ESTACIÓN CHICASANGA
(2320 msnm), periodo 1994-1997

Período	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	Total
1994	11.6	12.3	6.4	48.7	120.3	214.1	144.5	252.8	202.8	110.2	64.3	30.5	1218.5
1995	4.9	7.9	14.6	62.36	146.9	290.9	152.7	192.2	292.4	158.9	23.1	7.4	1354.8
1996	29.0	0.0	0.0	85.1	235.5	199.5	314.9	145.7	226.0	64.7	28.8	12.4	1341.6
1997	0.0	8.4	14.5	75.5	103.5	201.3	254.3	106.7	241.5	202.8	123.0	30.8	1362.3
Media	11.38	7.15	8.88	67.92	151.6	226.5	216.6	174.4	240.7	134.2	59.8	20.3	1319.3



Para este estudio se analizó el año meteorológico de 1996 (cuadros 1 y 2), porque se contaba con datos diarios de lluvia y evaporación de las dos estaciones meteorológicas. Además este año, representa en buena medida el promedio de las precipitaciones.

● Precipitación efectiva

La precipitación efectiva es la porción de la precipitación pluvial que puede infiltrarse en el suelo y estar disponible para las raíces de las plantas o bien percolarse al acuífero [Pacheco, 1981]. Por lo que es la precipitación que sirve para estimar el balance hídrico.

La capacidad de infiltración se estimó por medio de dos pruebas (una en la parte alta y otra en la parte baja de la cuenca), utilizando el método de Porchet [en Custodio y Llamas, 1983]. Obteniéndose valores de capacidad de infiltración (fc) de: 9 cm/hr (2160 mm/día) para los suelos de la parte alta y de 6 cm/hr (1440 mm/día) para los suelos de la parte baja.

Cuadro 2
DATOS DE PRECIPITACIÓN PLUVIAL
MENSUAL (mm) ESTACIÓN LA ALAMEDA
(1767 msnm), periodo 1994-1997

Período	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	Total
1994	9.7	2.4	4.8	23.2	171.1	170.4	94.4	203.6	9.6	77.4	9.6	6.1	892.3
1995	0.0	0.0	23.5	45.0	94.6	268.5	149.2	149.3	232.9	126.1	3.5	30.6	1123.2
1996	6.7	0.0	0.0	91.9	143.9	223.3	188.0	149.2	205.2	81.7	23.9	27.0	1140.8
1997	0.0	1.0	0.0	17.0	69.5	212.7	88.0	80.2	288.9	98.1	49.5	4.0	908.9
MEDIA	4.1	0.85	7.075	44.28	119.8	218.7	129.9	145.6	211.7	95.83	21.63	16.93	1016.3

Fuente: IIA-DIGI [1997].

Para la determinación de la precipitación efectiva diaria, se utilizó la metodología propuesta por la Universidad Autónoma de Chapingo, México. El método aplicado fue el de Palacios Vélez [1971, en Pacheco 1981]. Con las que se obtuvieron porcentajes de infiltración de 78 a 94%. Los resultados resumidos de forma mensual de los valores de precipitación efectiva para las partes baja y alta de la cuenca, se presentan en el cuadro 3.

Evapotranspiración

La evapotranspiración, llamada también "uso consuntivo" del cultivo, es la suma de los fenómenos de la evaporación del suelo y la transpiración de las plantas [Herrera, 1995]. Con fines prácticos la evapotranspiración representa toda el agua que desaparece de cualquier área (con o sin cobertura vegetal) por efecto del clima y por lo tanto, es muy importante, ya que reduce en relativamente grandes cantidades el agua para la recarga del acuífero, así como la cantidad de agua que llega al río Itzapa.

Cuadro 3
VALORES DE PRECIPITACIÓN EFECTIVA (cm) DE 1996

Parte de la cuenca	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
Baja (Estación La Alameda)	0.648	0.0	0.0	8.147	13.04	20.838	15.956	13.468	18.167	6.885	2.333	2.317
Alta (Estación Chicasanga)	2.42	0.0	0.0	7.575	18.723	18.723	27.395	13.441	18.214	6.014	2.812	1.163

La evapotranspiración en general se considera como el 80% de la evaporación medida en el evaporímetro tipo A, aunque algunos investigadores como Penman [1948] consideran que es el 75%. Los valores típicos de evapotranspiración potencial varían entre 1 a 3 mm/día para los climas templados, de 5 a 8 mm/día en los trópicos húmedos y de 10 a 12 mm/día en regiones áridas [Cabrera, 1998].

En la cuenca se determinan dos tipos de clima: uno más seco en la parte baja de la cuenca y con cultivos anuales (maíz y frijol); y otro más húmedo en la parte alta y con alto porcentaje de cobertura vegetal arbórea y arbustiva (pino, ciprés, aliso o ilamo, encino, etc.), haciéndose necesario tomar los datos de evaporación de dos estaciones meteorológicas representativas de cada área: La Alameda de la parte baja y Chicasanga en la parte alta.

En el cuadro 4, se presentan los valores de evapotranspiración potencial (ETP) mensuales calculados de acuerdo a la fórmula general: $ETP = 0.8 \times$ (Evaporación de tanque A).

Cuadro 4
EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL (cm) DEL AÑO 1996

Parte de la cuenca	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
Baja (Estación La Alameda)	9.048	10.624	2.904	14.088	14.016	11.991	11.824	9.384	9.088	8.87	7.212	8.544
Alta (Estación Chicasanga)	6.592	9.612	8.488	6.328	6.948	5.168	8.112	7.462	7.496	5.752	5.032	4.392

Escorrentía superficial

En la cuenca del río Itzapa se encuentran ubicadas dos estaciones hidrométricas de control de caudales: "Xipacay" en la parte media y "El Puente" en la parte final de la misma, por lo que constituye esta última, el punto de aforo de la cuenca. En el cuadro 5 se presentan los caudales medios mensuales para el año 1996 de estas estaciones.

Los caudales del río Itzapa, son pequeños durante todo el año, lo cual lo demuestra Santos Mancilla (1997), en su estudio de simulación hidrológica de la cuenca para el período de 1991 a 1995, determinando un caudal característico máximo de 300 l/s, un caudal medio es de 38 l/s y un caudal de estiaje de 15 l/s.

Con el fin de cuantificar las pérdidas del caudal del río por infiltración, se realizaron varios aforos diferenciales en diferentes meses del año 1998, utilizando 14 sitios del trayecto del río desde la Quebrada Chicasanga hasta la estación limnimétrica El Puente, en el punto de aforo de la cuenca. Al interpretar los aforos, se dedujo que el caudal aumenta en algunos tramos de la parte alta del río por aporte de quebradas y pequeños manantiales alimentados

Cuadro 5
CAUDALES MEDIOS MENSUALES (L/s) DEL AÑO 1996

Estación	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
Limnimétrica												
Xipacay	49.37	39.5	36.46	43.52	53.79	86.56	121.7	113.9	111.08	106.73	79.02	62.93
El Puente	42.51	25.33	35.60	68.68	66.48	138.07	279.86	190.1	272.26	158.18	69.77	39.15
Nacimiento												
Xipacay	36.32	19.72	16.89	14.10	13.59	14.70	16.79	42.39	46.02	43.61	40.82	38.0

por flujo subsuperficial, pero de la parte media a la parte baja, donde no existen quebradas y manantiales que alimenten al río, se identifica claramente que los caudales del río decrecen hacia el punto de aforo, siendo el río influente. Las pérdidas de caudal en la parte baja para el año 1998, variaron de 30.59 l/s en febrero, 28.2 l/s en abril, 19.2 l/s en mayo, y 13.2 l/s en julio.

Estimación de la recarga

Las condiciones del área, indican una distribución espacial de la recarga a la cuenca del río Itzapa, delimitándose tres áreas de recarga:

La parte baja de la cuenca, con un área de 11.22 Km², en la cual se recarga directamente al acuífero por infiltración de la precipitación pluvial.

La parte alta de la cuenca, con un área de 15.49 Km², en la cual después de la infiltración de la lluvia, se produce cierta descarga al río como flujo subsuperficial y posteriormente la recarga al acuífero profundo.

La recarga lateral, en la parte noroeste de la cuenca del río Itzapa. Ésta corresponde a una pequeña parte que aporta agua a la cuenca a través de un tubo de flujo.

La recarga directa al acuífero se realizó de forma diaria y mensual para el año 1996, aplicando el método de Penman y Grindley, para lo cual se utilizó un programa de cálculo de balance de humedad de suelos elaborado por Rodríguez [1990], donde la recarga directa al acuífero se realiza una vez que el proceso de evapotranspiración se ha efectuado y la capacidad de campo del suelo se completa. Para comparar los factores propios del método de trabajo,

los cálculos de recarga se realizaron utilizando los dos métodos de variación de evapotranspiración real: 1) constante y 2) lineal.

RECARGA DE LA PARTE BAJA DE LA CUENCA

Los resultados de la lámina total de recarga en la parte baja de la cuenca se resumen en el cuadro 6. Al comparar los valores de recarga obtenidos por el cálculo del balance hídrico mensual y diario, se muestra una diferencia del 18% (método constante) y 27% (método lineal) más en el cálculo diario. Que al igual que otras investigaciones realizadas, demuestra que a mayor intervalo temporal de cálculo en el balance hídrico se subestima la recarga. Por tal motivo para la parte baja de la cuenca, se considera que el valor más exacto es 34.5 cm, obtenido a través del análisis diario y de la relación lineal.

RECARGA DE LA PARTE ALTA DE LA CUENCA:

La recarga por la lluvia en las partes montañosas no llega directamente al acuífero profundo, sino que parte se descarga a las quebradas y ríos como flujo subsuperficial. Éste trae como resultado la salida de agua en forma dispersa en los suelos de las partes

Cuadro 6
RECARGA ANUAL DE LA PARTE BAJA DE LA CUENCA DEL RÍO ITZAPA

Método de la relación constante ETR/ETP		Método de la relación lineal ETR/ETP	
Recarga calculada de forma mensual 21.3cm	Recarga calculada de forma diaria 26.0 cm	Recarga calculada de forma mensual 25.2 cm	Recarga calculada de forma diaria 34.5 cm

bajas de las laderas y en algunas partes de forma concentrada por medio de manantiales que contribuyen a mantener el caudal del río Itzapa.

Por lo anterior, para la cuantificación correcta de la recarga al acuífero profundo en esta área, en el balance hídrico de suelos se tomó en cuenta el escurrimiento subsuperficial medido en la estación hidrométrica Xipacay que representa el límite de las partes alta y baja de la cuenca. La lámina mensual del caudal se calculó de acuerdo a la relación: Caudal /Área de la parte alta ($15.49 \times 10^6 \text{ m}^2$).

Los resultados del total de la lámina de recarga de la parte alta de la cuenca se resumen en el cuadro 7. Al comparar los valores de recarga se muestra una diferencia del 11% más en el cálculo del método de la relación lineal.

RECARGA LATERAL:

La recarga lateral comprende el agua que entra al acuífero por flujo horizontal en la parte noroeste de la cuenca, cerca de Zaragoza. Para la estimación de esta recarga lateral, se utilizó el caudal de entrada del tubo de flujo que aparece en el mapa de isofreáticas. El cálculo del caudal se obtuvo por medio de la ecuación de Darcy: $Q = T \cdot i \cdot w$

Cuadro 7
RECARGA ANUAL DE LA PARTE
ALTA DE LA CUENCA DEL RÍO ITZAPA

Método de la relación constante ETR/ETP	Método de la relación lineal ETR/ETP
Recarga calculada de forma mensual 35.44 cm 39.9 cm	Recarga calculada de forma mensual

en donde:

Q = caudal que pasa por el tubo de flujo ($\text{m}^3/\text{día}$)

T = transmisividad de la sección acuífera ($\text{m}^2/\text{día}$)

i = gradiente hidráulico

w = ancho del tubo de flujo (m)

Se tomó el valor de transmisividad de 12.3 $\text{m}^2/\text{día}$ del pozo más cercano al área considerada (pozo No. 31), en el Cantón San Antonio en Zaragoza. Un gradiente hidráulico de 0.071 y un ancho de 2800 m en la celda analizada, con lo cual se obtuvo un caudal de agua de recarga al acuífero por aporte lateral de 2445.24 $\text{m}^3/\text{día}$ ($0.893 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{año}$).

ESTIMACIÓN DE LA RECARGA TOTAL EN LA CUENCA

Los resultados de la recarga total anual a la cuenca del río Itzapa para el año 1996, se presenta en el cuadro 8. El volumen total de recarga es de 10.945 millones de metros cúbicos, apreciándose que la mayor cantidad de recarga al acuífero se da en la parte alta de la cuenca con 6.18 millones de metros cúbicos, que representa el 56.5% de la recarga total. En

Cuadro 8
VOLUMEN DE RECARGA ANUAL EN
LA CUENCA DEL RÍO ITZAPA (1996)

Recarga	Lamina de agua (m)	Volumen anual ($\text{m}^3 \times 10^6$)
Parte baja de la Cuenca (Área = 11.22 Km^2)	0.345	3.871
Parte alta de la Cuenca (Área = 15.49 Km^2)	0.399	6.181
Lateral (en la parte noroeste)		0.893
		Total = 10.945

segundo lugar la parte baja de la cuenca representa el 35.4% (3.871 millones de metros cúbicos). Mientras que la recarga lateral sólo representa el 8.1% de la recarga total.

Aguas subterráneas

LÍMITES DEL ACUÍFERO

Hidrogeológicamente en el área de estudio existe un acuífero constituido por rocas volcánicas terciarias, caracterizándose por tener porosidad secundaria (por fracturas). Sus límites al sur y al oeste, corresponden en gran medida con los de la cuenca hidrográfica del río Itzapa. Sin embargo, en sus partes norte y este, sobrepasan los límites de la cuenca hidrológica superficial, siendo la cuenca hidrogeológica mucho más amplia, principalmente hacia Chimaltenango, El Tejar y Parramos, como se observa en el mapa de isofreáticas. Los límites están en concordancia a los de la cuenca del río Guacalate, los cuales están dados por un control volcano-tectónico, que ha dado lugar al basculamiento de bloques, sobre todo en las partes sur y oeste de la zona, es decir, en Acatenango y Zaragoza respectivamente.

El espesor máximo de los flujos riolíticos y obsidianas, encontrado por medio de perforaciones, es de 82 metros en el pozo de la lotificación Colinas de San Andrés. Esto indica que el espesor aumenta hacia la región montañosa, al suroeste de la cuenca, y disminuye hacia el este y noreste, como se aprecia en los perfiles hidrogeológicos.

Hidrogeológicamente en el área de estudio existe un acuífero constituido por rocas volcánicas terciarias, caracterizándose por tener porosidad secundaria (por fracturas).

CARACTERÍSTICAS DEL ACUÍFERO

TRANSMISIVIDAD. En la prueba del pozo bombeado de la lotificación Colinas de San Andrés, por el método de Jacob se obtuvo una **transmisividad de 5,150 m²/día**. Con este mismo método para el pozo de observación DONG BANG en El Tejar, se obtuvo una transmisividad de **7,124 m²/día**. Además, utilizando la curva patrón de Theis [1935], se calculó la transmisividad para el pozo de observación DONG BANG, dando un valor de **7,150 m²/día**.

COEFICIENTE DE ALMACENAMIENTO. El valor de coeficiente de almacenamiento, se pudo calcular en el pozo de observación DONG BANG (El Tejar), donde se tiene una distancia al pozo de observación de 89.4 m, determinándose un valor de coeficiente de almacenamiento de **0.014** por el método de Jacob y de **0.018** por el método de Theis, lo que indica que es un acuífero libre o freático.

NIVELES Y MOVIMIENTO DE AGUA SUBTERRÁNEA

Para determinar los niveles del acuífero, se inventariaron 32 pozos de agua, de los cuales 6 se localizan dentro de la cuenca hidrográfica del río Itzapa. Estos seis pozos se ubican principalmente en la parte baja y los restantes 26 se encuentran en los alrededores de la cuenca, en los municipios de Parramos, El Tejar, Chimaltenango y Zaragoza, como se observan en el cuadro 9, y la figura 6.

En la zona de estudio, se presentan profundidades del nivel estático bajo la superficie del terreno desde 24.7 m en la lotificación Estancia de la Virgen (en parte más baja) hasta 120 m en el poblado de

San Andrés Itzapa (en la parte media). Para evitar esta variación tan grande por efecto de la altitud, se determinaron los niveles estáticos con respecto al nivel del mar, dando como resultado que los niveles se encuentran entre los 1720 a los 1750 msnm en la parte baja de la cuenca y entre 1800 a 1950 msnm en la parte alta de la misma.

Con base a los datos recopilados de niveles estáticos de los pozos principalmente en época seca, se confeccionaron las isofreáticas, que representan la dirección del flujo del agua subterránea del acuífero, el cual muestra una tendencia de Oeste a Este, por lo que el flujo está controlado por el río Guacalate, con una recarga desde las partes altas al sur y oeste.

Las diferencias del nivel estático durante el año, fluctúan entre 0.15 a 3.35 metros, es decir, que en época lluviosa los niveles ascienden. Esto revela que existen variaciones del nivel freático por cambios estacionales.

CARACTERÍSTICAS Y PRODUCCIONES DE POZOS

La mayoría de pozos son perforados, con diámetros de 8 pulgadas y revestidos con tubería metálica, existiendo algunos pozos excavados que son hechos a mano con diámetros entre 80 a 100 centímetros y sin revestimiento.

La explotación del agua subterránea en la cuenca por medio de pozos mecánicos oscila entre 3 a 15 litros por segundo por pozo (50 a 240 galones por minuto), de acuerdo al uso que se le dé, siendo principalmente para agua potable (4 pozos) y riego (3 pozos). Estos bombeos no son continuos, por lo que la explotación del agua subterránea, en la mayoría de casos, trabajan un promedio de 50 a 85 horas

La mayoría de pozos son perforados, con diámetros de 8 pulgadas y revestidos con tubería metálica, existiendo algunos pozos excavados que son hechos a mano con diámetros entre 80 a 100 centímetros y sin revestimiento.

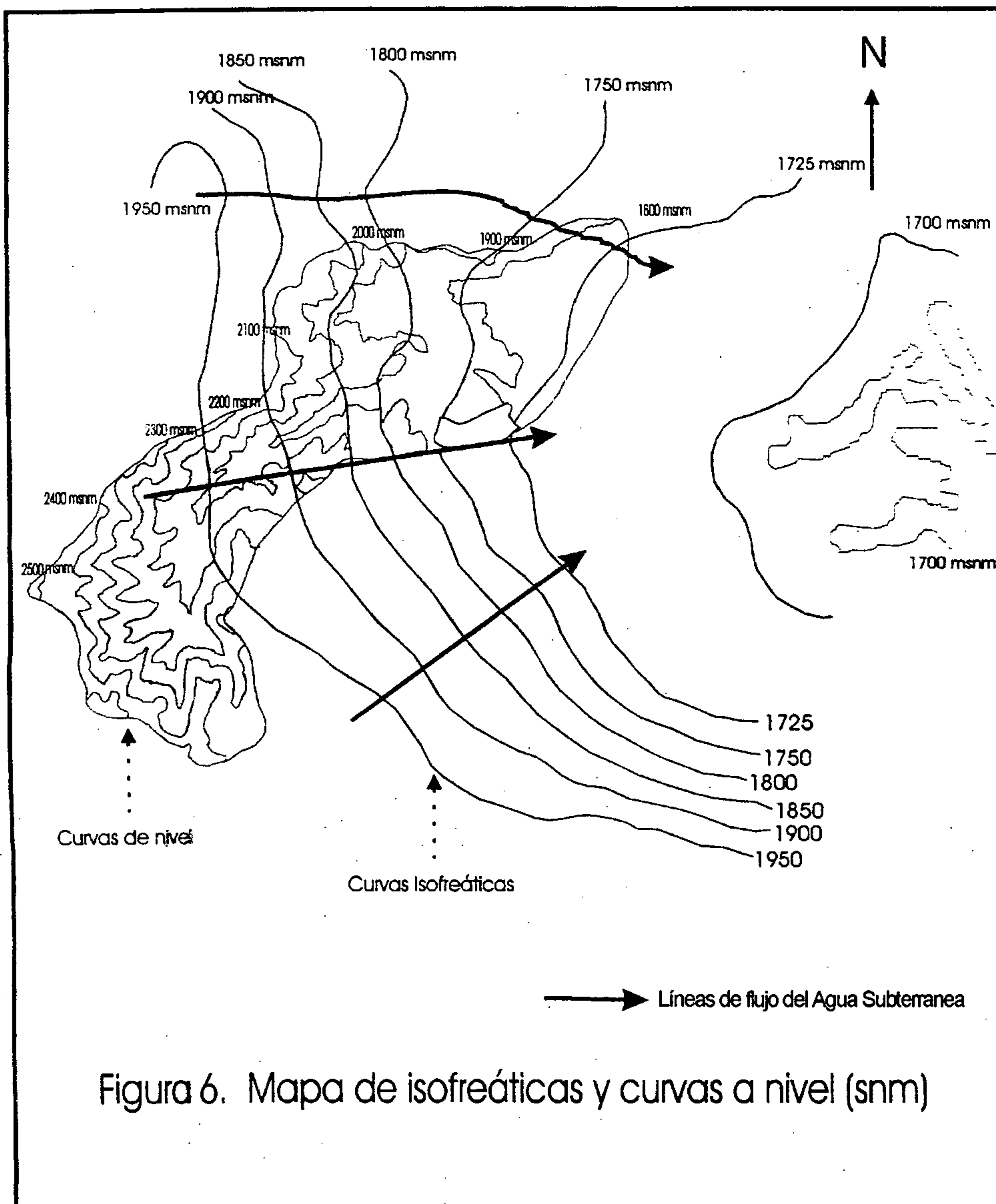
Cuadro 9.
DATOS DE POZOS DE AGUA DE LA CUENCA DEL RÍO ITZAPA
Y ALREDEDORES, DEPARTAMENTO DE CHIMALTENANGO

N° Pozo	Municipio	Lugar	Coordenadas (UTM)		Altitud (msnm)	Tipo de pozo
			Latitud	Longitud		
1	San Andrés Itzapa	Lotificación Colinas San Andrés	1618.6	732.7	1820	Perforado
2	San Andrés Itzapa	Lotif. Estancia La Virgen	1619.6	734.2	1745	Perforado
3	San Andrés Itzapa	Costado Este de la Municipalidad	1617.4	732.3	1848	Perforado
4	San Andrés Itzapa	Finca Cauque Farm	1618.8	733.9	1775	Perforado
5	San Andrés Itzapa	Granja Avícola Las Tunas	1618.3	733.8	1785	Perforado
6	San Andrés Itzapa	Terreno de A. Zamora	1318.8	733.6	1765	Excavado
7	San Andrés Itzapa	Agroverde, La Cuchilla	1617.8	733.7	1788	Perforado
8	San Andrés Itzapa	Finca El Panaj	1616.2	735.3	1770	Perforado
9	Parramos	Ortifrut Guatemala S.A.	1613.9	735.9	1838	Perforado
10	Parramos	Municipalidad	1616.2	736.7	1763	Perforado
11	Parramos	Agroverde	1616.2	737.6	1763	Perforado
12	El Tejar	Escuela San Miguel Morazán	1619.7	739.8	1779	Perforado
13	El Tejar	Parque San Miguel Morazán	1619.8	739.6	1779	Perforado
14	El Tejar	Fábrica Dong Bang	1619.9	738.4	1763	Perforado
15	El Tejar	Fábrica Avantex	1619.9	738.3	1763	Perforado
16	El Tejar	En el pueblo, El Potrerito	1620.4	738.2	1770	Perforado
17	Chimaltenango	Digesa I	1620.5	736.6	1767	Perforado
18	Chimaltenango	Digesa III	1619.1	736.9	1766	Perforado
19	Chimaltenango	Alameda -ICTA	1619.2	736.7	1766	Perforado
20	Chimaltenango	Bosques de Santa Ana, Los Aposentos	1619.1	735.0	1765	Excavado
21	Chimaltenango	Bosques de Santa Ana, Los Aposentos	1619.2	734.9	1762	Excavado
22	Chimaltenango	Quinta Los Aposentos	1620.9	735.1	1789	Perforado
23	Chimaltenango	Hospital Departamental	1620.9	735.5	1785	Perforado
24	Chimaltenango	Quintas Las Victorias	1621.2	736.7	1775	Perforado
25	Chimaltenango	La Terminal	1622.0	735.4	1795	Perforado
26	Chimaltenango	Hotel La Predilecta (El Alamo)	1621.6	734.9	1805	Perforado
27	Chimaltenango	Al lado de la estación de bomberos	1621.8	733.8	1825	Perforado
28	Chimaltenango	Buena Vista	1622.3	733.1	1745	Perforado
29	Chimaltenango	La Pedrera	1622.2	731.7	1861	Perforado
30	Zaragoza	Aldea El Llano	1622.1	740.0	2030	Perforado
31	Zaragoza	Cantón San Antonio	1621.2	728.2	2060	Perforado
32	Zaragoza	Caserío El Pilar	1621.2	727.0	2054.3	Perforado

continúa cuadro 9

Cuadro 9.
DATOS DE POZOS DE AGUA DE LA CUENCA DEL RÍO ITZAPA
Y ALREDEDORES, DEPARTAMENTO DE CHIMALTENANGO

Usos	Profundidad (m)	Nivel Estático (NE) m		Fecha de toma del NE	Caudal (l/s)	Diámetro de encamizado (pulgadas)	Profundidad de rejilla (m)
		Bajo la superficie del terreno	Sobre el nivel del mar				
Agua potable	152.0	89.1	1730.9	3/02/98	6.3	8	91-152
Agua potable	91.0	24.7	1720.3	6/12/97	3.2	8	24-91
Agua potable	183.0	120.0	1728.0	19/03/98	14.2	8	
Riego y agua potable	145.0	52.0	1723.0	19/03/98	5.0	8	
Agro-industrial		61.4	1723.6	22/07/97	3.0	8	
Riego	40.5	39.5	1725.5	13/01/98			
Riego	124.4	65.6	1722.4	7/07/79	15.3	8	
Riego	131.0	57.0	1713.0	4/08/91	24.2	8	75-130
Riego	216.5	122.0	1716.0	22/07/95	22.8	8	115-214
Agua potable	213.6	72.8	1690.2	1/04/81	18.5	8	
Riego	186.5	79.9	1683.1	21/11/86	27.0	8	98-146 y 158-185
Agua potable	146.3	81.0	1698.0	13/01/98	3.4	6	
Agua potable	182.0	80.8	1698.2	6/08/97	7.3	8	81-182
Industrial-agua potable	150.0	71.8	1691.2	21/02/98	5.0	8	73-150
Industrial-agua potable	140.0	71.6	1691.4	21/02/98	6.3	8	73-140
Agua potable		67.9	1702.2	27/02/98	4.7	8	
Abandonado	207.0	46.3	1720.7	18/02/98		8	
Riego	182.8	58.9	1707.2	18/03/98	18.0	8	
Riego y agua potable	239.6	58.0	1708.2	24/03/81	17.0	8	
Agua potable	55.0	53.5	1711.5	18/02/98			
Agua potable	53.0	49.3	1712.7	18/02/98			
Agua potable	152.4	57.5	1731.5	19/03/98	6.0	8	
Agua potable	152.0	55.0	1730.0	1/09/92	2.0	6	
Agua potable	143.3	45.0	1730.0	23/12/83	9.0	6	
Agua potable	140.0	67.2	1727.8	23/02/98	15.0	6	
Agua potable	142.0	72.3	1732.7	20/04/93	7.3	6	97-138
Agua potable	122.0	64.0	1761.0	22/03/98	4.4	8	
Agua potable	183.0	67.5	1777.5	23/03/98	18.9	6	80-105 y 137-178
Agua potable	152.0	69.2	1791.9	23/03/98	18.9	8	
Agua potable	304.0	198.0	1832.0	19/11/96	4.7	8	200-304
Agua potable	250.0	76.2	1983.8	25/10/96	8.8	8	128-250
Agua potable	300.0	164.5	1889.8	18/03/82	18.9	8	...



semanales, a excepción del pozo municipal de San Andrés Itzapa que bombea las 24 horas del día. La producción actual de aguas subterráneas en la cuenca, es de aproximadamente dos millones (1.91) de metros cúbicos por año.

POTENCIAL DEL RECURSO HÍDRICO

Analizando la recarga total anual de las aguas subterráneas que se produce en la cuenca de 10.945×10^6 m³/año y comparándola con la explotación actual de aproximadamente 1.912×10^6 m³/año, se tiene un balance positivo de 9.03×10^6 m³/año. Esto indica que existe un potencial hídrico subterráneo alto en la cuenca del río Itzapa, donde la explotación actual representa aproximadamente el 21% del recurso temporal, es decir, existe un 79% de excedente de agua subterránea.

DESARROLLO DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

CONSIDERACIONES SOBRE EL MANEJO DE LA CUENCA. En la cuenca del río Itzapa hay un buen potencial del recurso hídrico subterráneo, que ofrece la oportunidad real de ser desarrollado en gran cantidad especialmente en la parte baja, para habilitar áreas bajo riego y llenar los requerimientos de agua potable.

Sin embargo se debe efectuar un manejo conjunto de los recursos naturales, para asegurar una planificación, protección y gestión del agua subterránea. Para realizar la conservación de la cuenca y con la finalidad de obtener mejores resultados en el futuro en el manejo de los recursos hídricos, en la figura 7 se propone proteger y reforestar aquellas

En la cuenca del río Itzapa hay un buen potencial del recurso hídrico subterráneo, que ofrece la oportunidad real de ser desarrollado en gran cantidad especialmente en la parte baja, para habilitar áreas bajo riego y llenar los requerimientos de agua potable.

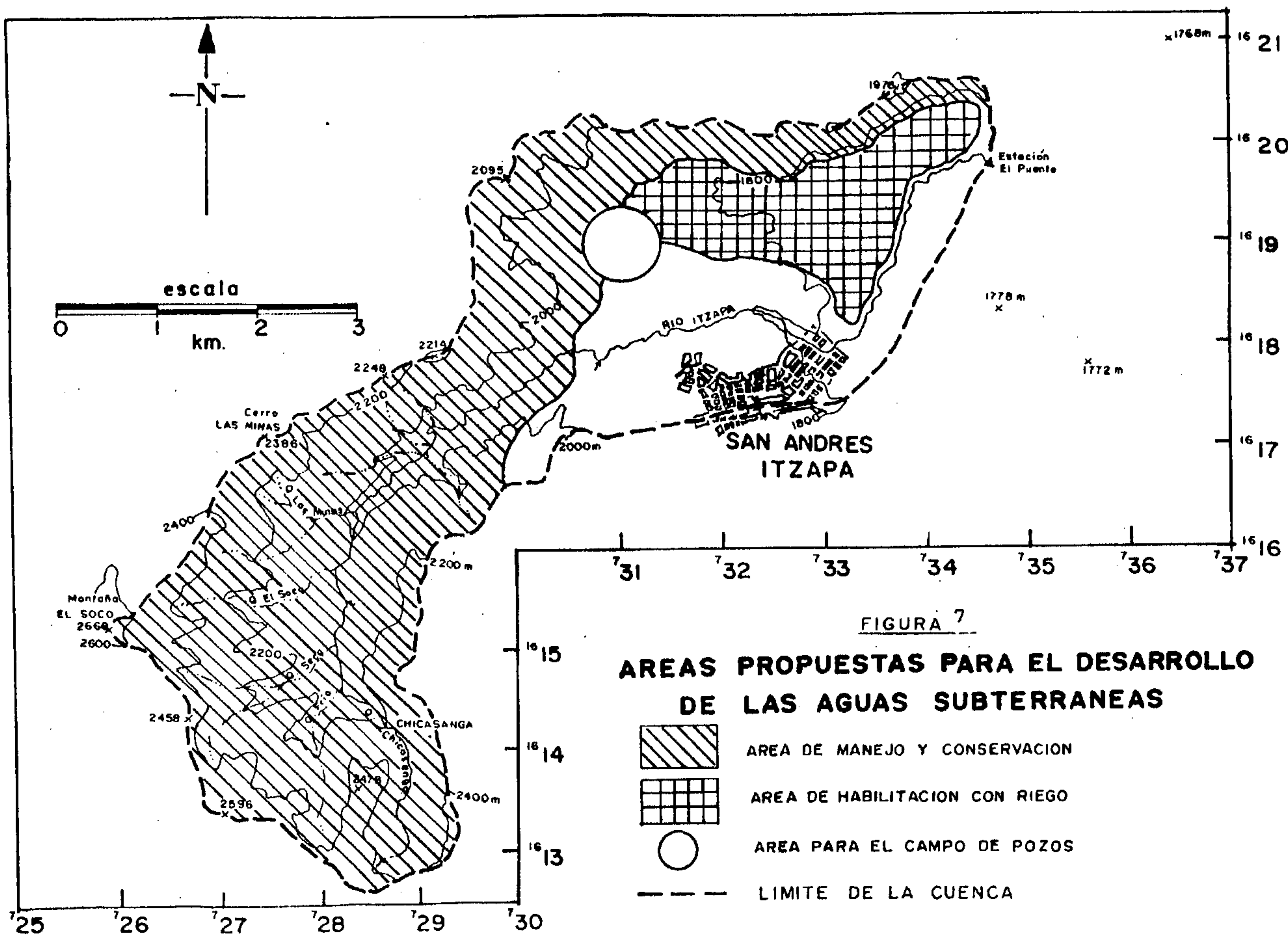
zonas que son importantes para que se dé el proceso de infiltración de la lluvia y la recarga al acuífero.

Las áreas propuestas teóricamente para la conservación de la cuenca, equivale a casi toda la parte alta, que son tierras para uso forestal y agroforestal. Sin embargo por los usos en la agricultura que se le da a esta parte, se recomienda que como mínimo se conserven las tierras boscosas en Chicasanga, la Montaña El Soco, Cerro Las Minas y los cerros que se extienden en las divisorias de aguas del oeste y del norte hacia Zaragoza.

Es importante que en los terrenos con pendientes fuertes que se dedican a la agricultura, se incorporen prácticas de conservación de suelos para evitar los efectos de la erosión y escurrimiento superficial. La conservación y reforestación de los bosques en las partes altas y de laderas, debe hacerse a través del Instituto Nacional de Bosques y la Facultad de Agronomía de la USAC, con apoyo de autoridades locales como la municipalidad y los comités de agua. Se recomienda además, realizar una correcta protección del manantial Xipacay, principalmente con la reforestación de sus alrededores, para conservar éste como lugar de recreación y espiritualidad, y mantener de esta forma el respeto de las costumbres y grupos indígenas.

La conservación y reforestación de los bosques en las partes altas y de laderas, debe hacerse a través del Instituto Nacional de Bosques y la Facultad de Agronomía de la USAC, con apoyo de autoridades locales como la municipalidad y los comités de agua.

DEMANDAS DE AGUA SUBTERRÁNEA. Para satisfacer las demandas de agua en la cuenca, la explotación del acuífero debe hacerse por extracción de agua subterránea por medio pozos perforados y recomendable a través de un campo de pozos al noroeste del poblado (figura 7). Que de acuerdo al mapa geológico y el mapa de isofreáticas, es donde existe una alta permeabilidad y un buen flujo de aguas



subterráneas, donde se deberá establecer un área de protección alrededor del campo.

- i) *Demanda de riego.* En la parte baja de la cuenca es donde se asienta la mayor parte de la población de San Andrés Itzapa, existiendo agricultores con unidades productivas de tamaño pequeño: 0.25 cuerdas (0.03 ha) a 20 cuerdas (2.24 ha) [IIA-DIGI, 1996]. Por lo que, es conveniente en esta área, organizar a los agricultores en cooperativas o grupos de usuarios de riego para la construcción de pozos comunales, con el fin de desarrollar la agricultura bajo riego y establecer cultivos más rentables como hortalizas, frutas y flores.

La demanda de agua para regar un total de 310 ha (figura 7), es de aproximadamente 4.0×10^6 m³/año, calculando una aplicación de agua de 1 L/s/ha. Requiriéndose construir de 12 a 15 pozos con producciones de 20 a 25 L/s, trabajando alrededor de 8 a 10 horas diarias.

- ii) *Demanda para agua potable.* La población de San Andrés Itzapa, es aproximadamente de 9,000 habitantes. Y tomándose como base una dotación de 180 L/día por habitante, se calcula que se necesitan alrededor de 20 L/s, por lo que el pozo actual de la municipalidad que produce 14.2 L/s, sólo satisface al 76% de la población. Captándose agua de los manantiales La Toma (al suroeste del pueblo) y La Chorrera en el río Negro (al este de Chicasanga) para suplir la demanda.

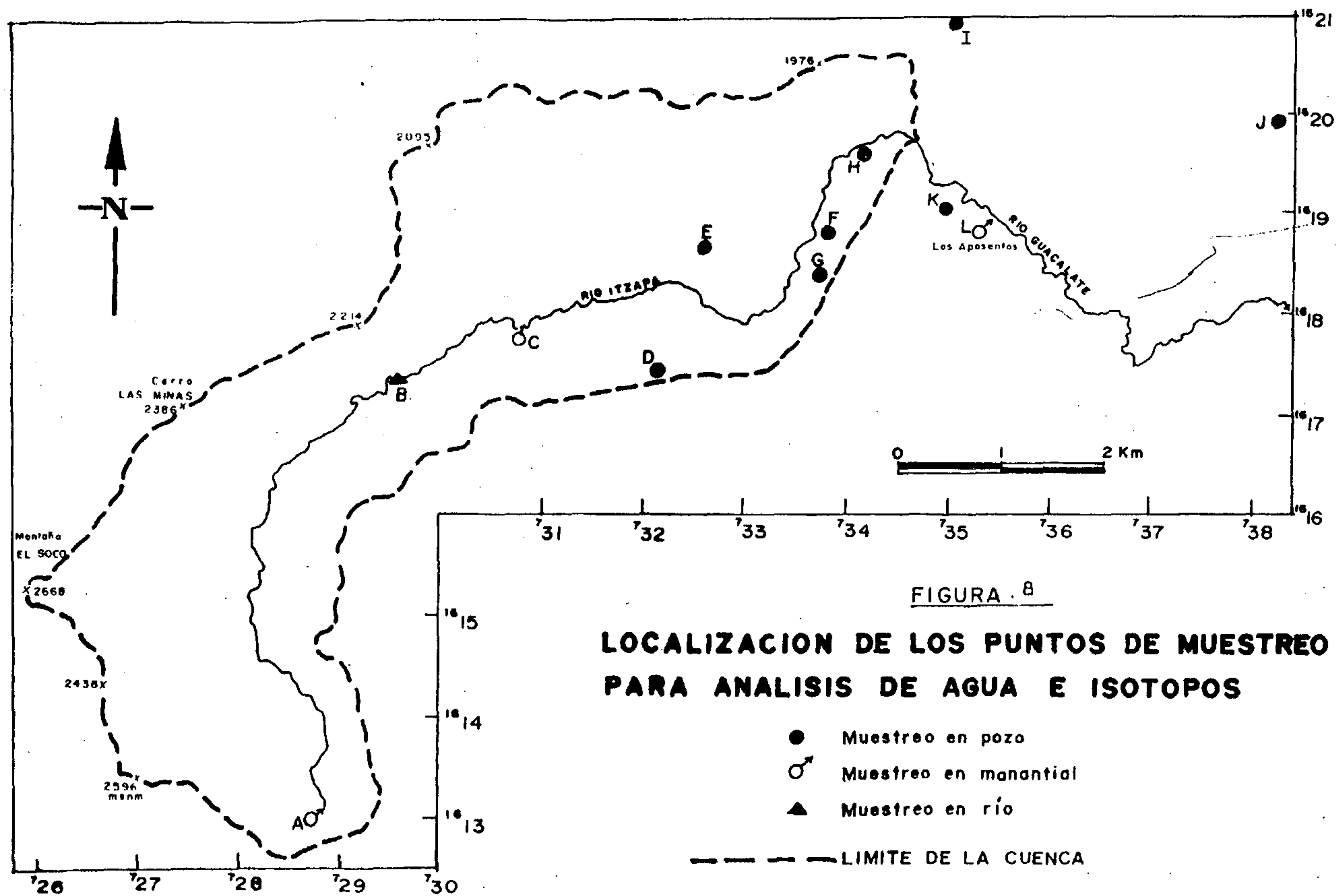
Hidrogeoquímica

QUÍMICA DEL AGUA

Para caracterizar en forma general la química del agua del área de estudio, se efectuó una campaña de muestreo en los pozos y manantiales, que se observan en la figura 8 y cuadro 10.

Los valores de temperatura de agua de los pozos es de 20.5 a 23.7 grados centígrados, con un valor promedio de 22.7 °C, el cual es muy similar al valor de la temperatura media anual de la cuenca de 23 °C, por lo que según la clasificación de Schoeller [1962] son aguas ortotermas o normales.

El pH en general es neutro (6.8 a 7.0), lo cual esta dentro del rango típico de valores de pH (6 - 8.5) en aguas subterráneas [Hem, 1985]. Por su parte, la conductividad eléctrica es muy baja, estando comprendida entre 157 a 215 MS/cm, es decir, el agua subterránea del área posee una baja cantidad de iones en solución y se encuentra comprendida entre los valores típicos más bajos del agua subterránea que varían entre 50 a 50,000 MS/cm [Cartwright et al., 1977, en Sanders, 1998].



Según el gráfico de Piper, los puntos muestreados se concentran en un mismo tipo de agua que es bicarbonatada-cálcico-magnésica, por lo que cabe suponer que por localizarse los pozos y manantiales en la parte alta de la cuenca hidrogeológica y por ser un acuífero libre, la química de sus aguas corresponde a las aguas de infiltración de lluvia. Ya que no se observa un patrón de evolución de las aguas a lo largo del sistema de flujo, posiblemente por el corto recorrido y la gran velocidad del agua subterránea, que no da tiempo para que se dé una evolución química. Siendo aguas jóvenes, con muy poca variación y sin mezcla de otras aguas subterráneas. En el cuadro 10, se presentan los resultados de la hidroquímica en mg/L, los cálculos del error del balance de carga y de los sólidos disueltos totales, cuyos valores están comprendidos entre 86 a 124 mg/l, los cuales son muy bajos y corresponden a aguas diluidas ($SDT < 1,000$ mg/l).

ANÁLISIS DE ALGUNOS CONTAMINANTES

Las sustancias químicas analizadas en este trabajo son el nitrato, el hierro y el flúor. En cuanto a los contenidos de nitratos en las aguas de los pozos dentro de la cuenca del río Itzapa, éstos son menores de 8 mg/l ($NO_3^- - NO_3^-$), por lo que están bajo la norma (45 mg/l de NO_3^-). Sin embargo en los pozos en Chimaltenango, presentan valores un poco más altos de 9.24 mg/L (muestra K del pozo Bosques de Santa Ana) y 10 mg/L (muestra J del pozo Avantex), mientras que en los manantiales varían de 3.3 mg/L (muestra C de Xipacay), 6.82 mg/L (muestra L de Los Aposentos) a 11.22 mg/L (muestra A de Chicasanga). La con-

Cuadro 10
RESULTADOS DE HIDROQUÍMICA,
ERROR Y SOLIDOS DISUELTOS TOTALES

Muestra	Ca ⁺⁺		Mg ⁺⁺		Na ⁺		K ⁺		Fe ⁺⁺		$\Sigma(m_c \cdot z)$ meq/L
	mg/L	meq/L	mg/L	meq/L	mg/L	meq/L	mg/L	meq/L	mg/L	meq/L	
A. Manantial											
Chicasanga	12.425	0.00062	4.984	0.00041	7.13	0.00031	4.301	0.00011	0.06	0.000002149	1.4522x10 ⁻³
B. Río Itzapa											
(parte alta)	15.03	0.00075	7.05	0.00058	7.59	0.00033	4.301	0.00011	5.11	0.000183	1.953x10 ⁻³
C. Manantial											
Xipacay	15.03	0.00075	6.442	0.00053	9.66	0.00042	3.91	0.00010	0.05	0.000001791	1.802x10 ⁻³
D. Pozo Municipal											
San Andrés	15.431	0.00077	7.537	0.00062	10.81	0.00047	4.301	0.00011	0.10	0.000003581	1.9726x10 ⁻³
E. Pozo Colinas											
San Andrés	15.03	0.00075	7.293	0.00060	12.88	0.00056	3.519	0.00009	0.12	0.0000043	2.004 x10 ⁻³
F. Pozo Cauque											
Farm	15.03	0.00075	7.293	0.00060	10.58	0.00046	3.519	0.00009	0.05	0.000001791	1.902 x10 ⁻³
G. Pozo Avícola											
Las Tunas	15.03	0.00075	7.05	0.00058	10.35	0.00045	3.91	0.00010	0.05	0.000001791	1.882 x10 ⁻³
H. Pozo Estancia											
de La Virgen	20.04	0.001	11.184	0.00092	10.575	0.00046	2.737	0.00007	2.05	0.00007341	2.523 x10 ⁻³
I. Pozo Quinta											
Los Aposentos	15.03	0.00075	8.265	0.00068	13.57	0.00010	3.91	0.00010	0.05	0.000001791	2.122 x10 ⁻³
J. Pozo Fábrica											
Avantex	17.435	0.00087	9.238	0.00076	13.34	0.00058	3.128	0.00008	0.10	0.000003581	2.294 x10 ⁻³
K. Pozo Bosques											
Santa Ana	29.86	0.00062	6.20	0.00051	10.81	0.00047	2.737	0.00007	0.06	0.00000215	1.672 x10 ⁻³
L. Manantial											
Los Aposentos	29.86	0.00062	5.713	0.00047	9.89	0.00043	3.128	0.00008	0.05	0.000001791	1.602 x10 ⁻³

continúa cuadro 10

Cuadro 10
RESULTADOS DE HIDROQUÍMICA,
ERROR Y SOLIDOS DISUELTOS TOTALES

Muestra	Cl ⁻		SO ₄ ²⁻		HCO ₃ ⁻		NO ₃ ⁻		F ⁻		(m _a .z)	Error	SDT
	mg/L	meq/L	mg/L	meq/L	mg/L	meq/L	mg/L	meq/L	meq/L	mg/L	meq/L		
	x10 ⁻⁴		x10 ⁻⁴		x10 ⁻³		x10 ⁻⁴		x10 ⁻⁵			%	meq/L
A. Manantial													
Chicasanga	5.0	1.41	8.0	1.66	66.0	1.082	11.22	1.81	0.28	1.474	1.585x10 ⁻³	-4.37	85.9
B. Río Itzapa													
(parte alta)	5.0	1.41	2.0	4.16	56.0	0.918	20.9	3.371	0	0	1.812x10 ⁻³	3.75	94.5
C. Manantial													
Xipacay	5.0	1.41	7.0	1.46	88.0	1.442	3.3	0.5323	0.29	1.53	2.277x10 ⁻³	-11.64	94.0
D. Pozo Municipal													
San Andrés	4.5	1.27	1.0	0.21	98.0	1.606	4.4	0.71	0.15	0.79	1.833x10 ⁻³	3.67	96.4
E. Pozo Colinas													
San Andrés	6.5	1.83	2.0	0.42	100.0	1.639	7.19	1.16	0.22	1.16	1.992x10 ⁻³	0.30	103.9
F. Pozo Cauque													
Farm	6.5	1.83	5.0	1.04	94.0	1.54	5.06	0.816	0.50	2.63	1.935x10 ⁻³	-0.86	99.8
G. Pozo Avícola													
Las Tunas	9.5	2.68	6.0	1.25	96.0	1.573	5.72	0.9226	0.38	2.0	2.078x10 ⁻³	-4.95	105.2
H. Pozo Estancia													
La Virgen	5.5	1.55	12.0	2.50	106.0	1.737	7.48	1.206	0.09	0.474	2.267x10 ⁻³	5.34	123.8
I. Pozo Quinta Los													
Aposentos	6.0	1.69	2.0	0.42	110.0	1.803	5.28	0.8516	0.50	2.632	2.125x10 ⁻³	-0.07	108.7
J. Pozo Fabrica													
Avantex	5.0	1.41	4.0	0.83	118.0	1.934	10.0	1.613	0.18	0.95	2.329x10 ⁻³	-0.76	120.4
K. Pozo Bosques													
Santa Ana	5.0	1.41	2.0	0.42	76.0	1.245	9.24	1.49	0.34	1.80	1.595x10 ⁻³	2.36	103.6
L. Manantial Los													
Aposentos	5.0	1.41	16.0	3.33	86.0	1.409	6.82	1.10	0.12	0.632	1.999x10 ⁻³	-11.02	118.9

centración más alta en nitrato de 20.9 mg/L se presenta en el río Itzapa (muestra B).

Los resultados bajos pueden ser debidos a que no hay descomposición de materia orgánica, que hay poco uso de fertilizantes y que casi no hay filtración de aguas negras por estar ubicado el acuífero en un área con poca densidad de población. Considerándose que la principal razón por la que existen bajos niveles de nitrato en el área, es por la zona no saturada gruesa de materiales piroclásticos que alcanzan espesores mayores de 60 m en la parte baja de la cuenca del río Itzapa, siendo una capa geopurificadora y permitiendo un cribado a nivel molecular y adsorción por intercambio iónico con los contaminantes.

En lo que respecta al hierro (Fe^{++}), sólo en la muestra de agua de río presenta concentraciones altas de 5.11 mg/L, mientras que en el agua de los pozos y manantiales los contenidos son menores de 0.12 mg/L, bajo el límite máximo permisible (LMP) de 1.0 mg/L, según norma COGUANOR [1984]. Finalmente, los contenidos de flúor varían entre 0.09 a 0.5 mg/L, los cuales están abajo del límite máximo permisible de 1.7 mg/L, que establece la norma.

CALIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA

PARA CONSUMO HUMANO. Los parámetros de calidad físico-química que fueron medidos y analizados son: aspecto, color, turbiedad, olor, pH, nitrato, cloruro, fluoruro, sulfato, hierro, bicarbonatos, calcio, magnesio, sodio, potasio, número total de gérmenes y número de coliformes totales.

Comparando los valores de la muestras con los de la norma COGUANOR [1984], la mayoría de las muestras analizadas el color varía entre 1 a 3

unidades, que es menor que 50 unidades (LMP) que establece la norma, a excepción de las muestras tomadas en los pozos Avantex (85 u) y Estancia La Virgen (240 u). De forma similar para la turbiedad, se presentan valores entre 0.35 a 3.5 UTN menores a 5 UTN (LMA) para la mayoría de muestras, a excepción de los pozos Avantex (16 UTN) y Estancia La Virgen (45 UTN).

Comparando los valores físico-químicos sanitarios de las muestras de aguas subterráneas con los límites aceptables de la norma, se observa que la cantidad de sólidos disueltos totales varían entre 86 a 124 mg/L, muy por debajo del límite máximo aceptable (LMA) de 500 mg/L. De la misma manera los aniones presentan concentraciones muy por debajo de los límites máximos aceptables: cloruro (4.5 - 9.5 mg/L < 200 mg/L); sulfato (1 - 16 < 200 mg/L); mientras que otros están por debajo de los límites máximos permisibles (LMP): nitrato (3.3 - 11.22 mg/L < 45 mg/L); fluoruro (0 - 0.5 mg/L < 1.7 mg/L); y carbonato de calcio que representa la dureza total (108 - 193 mg/L < 500 mg/L).

En cuanto a los cationes, las concentraciones de calcio (12 - 30 mg/L < 75 mg/L) y magnesio (5-11 mg/L < 50 mg/L) están también por debajo de los límites máximos aceptables, así como, la mayoría de resultados del hierro que presentan valores entre 0.05 a 0.1 mg/L, que son menores al LMP (1.00 mg/L).

De acuerdo a las comparaciones anteriores, se considera que las aguas subterráneas del área, se encuentran de forma general por debajo de los límites que establece la norma COGUANOR [1984], por lo que pueden ser utilizadas para consumo humano.

De acuerdo al examen bacteriológico del agua subterránea de pozos, la mayor parte de las muestras

dio resultados positivos, es decir, se determinaron innumerables número se gérmenes y de 43 a más de 2,400 coliformes por 100 cm³. Sin embargo, este análisis es muy influenciado por el cuidado en el muestreo, lo cual fue comprobado en el pozo de la municipalidad de San Andrés Itzapa, donde se realizaron dos muestreos para el análisis bacteriológico. En la primera muestra había un número de coliformes de más de 2,400 por 100 cm³, mientras que en la segunda se determinaron menos de 3 coliformes por 100 cm³ y 71 colonias de bacterias por cm³, lo que bacteriológicamente la hace agua potable.

Sin embargo, en cualquier caso para asegurar la calidad del agua contra la contaminación, es recomendable clorar el agua en el sistema de distribución antes de ser utilizada para consumo humano.

Sin embargo, en cualquier caso para asegurar la calidad del agua contra la contaminación, es recomendable clorar el agua en el sistema de distribución antes de ser utilizada para consumo humano.

PARA USO AGRÍCOLA. De acuerdo al diagrama de Wilcox [1948], el peligro de salinidad es bajo, ya que las aguas subterráneas se ubican en el rango de conductividad eléctrica de 160 a 215 micromhos/cm (a 25° C), que corresponde a la clase C-1 de baja salinidad. Con respecto a la sodicidad, las aguas se clasifican como S-1, aguas con bajo contenido de sodio y valores de relación de absorción de sodio de 0.4 a 0.7.

ANÁLISIS ISOTÓPICOS

Con el fin de evaluar cualitativamente el origen de la recarga en la cuenca del río Itzapa, se efectuó el análisis de los isótopos, que son átomos de un mismo elemento químico que difieren en su masa. Los isótopos estables ambientales ¹⁸O y ²H llamado deuterio (D), son utilizados como trazadores del origen de

las aguas subterráneas dado que sus contenidos se consideran conservativos una vez que el agua ha entrado en el acuífero, ya que no se ven afectados por las interacciones del agua con la matriz del acuífero.

Los resultados del análisis de 10 muestras se presentan en el cuadro 11, los cuales se obtuvieron en el Laboratorio de Isótopos Estables de la Comisión Ejecutiva del río Lempa (CEL) de El Salvador. Las aguas fueron recolectadas y analizadas en marzo de 1998, donde las primeras 9 corresponden con los lugares muestreados para hidrogeoquímica (figura 8).

Los valores de $\delta^{18}\text{O}$ varían de -9.1 a -10.2 o/oo y de -65.5 a -69.8 o/oo en $\delta^2\text{H}$, concentraciones que según Aravena [comunicación personal, 1998], la recarga de las aguas subterráneas se produce tanto en la parte alta como en la parte baja de la cuenca, ya que las aguas subterráneas presentan concentra-

Cuadro 11
CONCENTRACIONES ISOTÓPICAS

Muestra	Lugar	Altitud (msnm)	$\delta^2\text{H}$ (o/oo)	$\delta^{18}\text{O}$ (o/oo)
A	Manantial Chicasanga	2380	-69.8	-10.2
B	Río Itzapa (parte alta)	1890	-65.5	-9.7
C	Manantial Xipacay	1855	-68.9	-10.1
D	Pozo de Municipalidad de San Andrés	1850	-67.2	-9.8
E	Pozo Lotificación Colinas San Andrés	1820	-69.8	-10.1
F	Pozo Finca Cauque Farm	1780	-66.7	-9.5
I	Pozo Colonia Quinta Los Aposentos	1790	-62.6	-9.1
K	Pozo Lotificación Bosques Santa Ana	1760	-64.4	-9.1
L	Manantial Los Aposentos	1710	-64.7	-9.1
M	Manantial Los Pajales, Acatenango	2200	-76.5	-11.0

Estos valores reportan un error experimental máximo de 0.1 o/oo para ^{18}O y de 1 o/oo para ^2H .

ciones isotópicas de ^{18}O y D, muy similares a las aguas de lluvia. Además por $\delta^{18}\text{O}$ se puede observar que no existen diferencias en las aguas del manantial Chicasanga (muestra A) de la parte alta (-10.2 o/oo), del manantial Xipacay (muestra C) de la parte media (-10.1 o/oo) y el pozo colinas de San Andrés (muestra E) en la parte baja (-10.1 o/oo). Mientras que el valor menos negativo ($\delta^{18}\text{O} = -9.1$) de las aguas de los pozos Quinta Los Aposentos (muestra I), Bosques de Santa Ana (muestra K) y el manantial Los Aposentos (muestra L, que constituye una zona de descarga), se interpreta de que puede ser también debido a que existe una cierta mezcla de aguas y que en esta zona se recibe agua de otros flujos subterráneos.

De este análisis isotópico, se encuentra que no existe diferencia en las aguas de los pozos, por estarse captando agua del mismo acuífero y tener la misma fuente de recarga por lluvia.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

- a) De acuerdo con el estudio geológico se concluye que en la cuenca existen cuatro unidades geológicas: i) andesitas, y ii) flujos riolíticos del Terciario; iii) rocas volcánicas recientes, y iv) tephras del Cuaternario.
- b) Del análisis hidrológico se concluye que el río Itzapa es influente. Y que se tiene un volumen total de recarga anual al acuífero de 10.95 millones de metros cúbicos.
- c) El estudio de aguas subterráneas determinó un

acuífero volcánico constituido por andesitas, riolitas y obsidianas. Concluyéndose que es libre, con un coeficiente de almacenamiento de 0.014 a 0.018, transmisividades en la parte baja de la cuenca de hasta 5,000 a 7,000 m²/día, y fluctuaciones del nivel estático entre 0.15 a 3.35 metros.

- d) En la cuenca existe un potencial del recurso hídrico subterráneo de 9.03 millones de metros cúbicos por año. Con una demanda de riego en la parte baja de 4x10⁶ m³/año para regar 310 hectáreas.
- e) Se concluye por hidrogeoquímica, que las aguas son jóvenes y con poca evolución. De tipo bicarbonatada - cálcico - magnésica, de baja salinidad y con bajo contenido de sodio.
- f) Las aguas subterráneas pueden ser utilizadas para consumo humano, ya que sus características físicas y químicas se encuentran por debajo de los límites de la norma COGUANOR. Mientras que de acuerdo a los resultados bacteriológicos de la mayoría de las muestras, éstas se encuentran por encima de los valores que establece la norma.

Las aguas subterráneas pueden ser utilizadas para consumo humano, ya que sus características físicas y químicas se encuentran por debajo de los límites de la norma COGUANOR.

Recomendaciones

- a) Realizar estudios geofísicos a fin de determinar de forma más precisa los límites del acuífero, principalmente en la parte noroeste de la zona. Posteriormente, se recomienda ubicar algunos piezómetros para efectuar ensayos por bombeo tanto en las partes altas como en el valle, con el objeto de definir mejor los parámetros hidrogeológicos.
- b) Es recomendable mantener un inventario y

efectuar pruebas de bombeo en los pozos públicos y privados de la zona para obtener mayor información hidrogeológica. Con el fin de definir modelos matemáticos del agua subterránea y mejorar las evaluaciones para el desarrollo del acuífero.

- Organizar a los pequeños agricultores en cooperativas o grupos de usuarios de riego para la construcción de pozos comunales en la parte baja, con el fin de desarrollar la agricultura bajo riego y establecer cultivos más rentables.*
- c) Se recomienda que a través del Instituto Nacional de Bosques y la Universidad de San Carlos, con apoyo de las autoridades locales contribuyan en la reforestación y conservación de los bosques en las partes altas y de laderas, para disminuir el escurrimiento superficial y mejorar la recarga al acuífero.
 - d) Realizar una correcta protección del manantial Xipacay, principalmente con la reforestación de sus alrededores, para conservar éste como un lugar de recreación y espiritualidad, y mantener de esta forma el respeto de las costumbres y grupos indígenas.
 - e) Es recomendable impulsar un plan de manejo del recurso hídrico en la cuenca, que tome en cuenta la construcción de un campo de pozos perforados en la parte baja, como se propone en la figura 7.
 - f) Organizar a los pequeños agricultores en cooperativas o grupos de usuarios de riego para la construcción de pozos comunales en la parte baja, con el fin de desarrollar la agricultura bajo riego y establecer cultivos más rentables.
 - g) Dentro de las estrategias y políticas de explotación del agua subterránea en la cuenca del río Itzapa, se recomienda delimitar y legalizar áreas de protección para el campo de pozos. Con el fin de prevenir la sobre-explotación y la contaminación del acuífero.

- h) Llevar un control de los pozos dentro de la cuenca, en cuanto a calidad de agua, caudales extraídos, período que laboran, niveles estáticos, niveles de bombeo, profundidad y características de construcción. Esto con el propósito de identificar las tendencias y los impactos químicos y físicos en las aguas subterráneas.
- i) Es recomendable construir un pozo de prueba y uno de observación, para calcular la producción en el área del campo de pozos propuesto. Y para estimar adecuadamente el número de pozos y la distancia entre los mismos.
- j) Se recomienda trasladar el pozo de abastecimiento público de San Andrés Itzapa, que representa riesgos de contaminación por lixiviados urbanos, al área del campo de pozos propuesto, si la prueba verifica la productividad de esta área.

BIBLIOGRAFÍA

- BENÍTEZ, A., 1972: Captación de Aguas Subterráneas. Editorial Dorsat S. A. Madrid, España. 619 p.
- BRGM-INSIVUMEH, 1997: Modelización del Transporte de agua y solutos en los estratos volcánicos y sedimentarios en la Ciudad de Guatemala. Proyecto de Cooperación Internacional Franco-Guatemalteco. Guatemala. 144 p.
- CABRERA, C. A., 1998: Determinación de Políticas de Explotación de las Aguas Subterráneas para las Aldeas San José Pacul y Pachali del Municipio de Santiago Sacatepéquez, Guatemala. Tesis Ing. Agr. Facultad

de Agronomía, Universidad de San Carlos de Guatemala. 62 p.

CASTANY, G., 1975: Prospección y Exploración de las Aguas Subterráneas. Ediciones Omega. Barcelona, España. 738 p.

CUSTODIO, E. y LLAMAS, R., 1983: Hidrología Subterránea. Segunda Edición, tomo I y II. Ediciones Omega, S.A. Barcelona, España. 2100 p.

FREEZE, R.A. & CHERRY, J.A., 1979: Groundwater. Prentice Hall. Englewood Cliffs New Jersey, USA. 604 p.

FETTER, C.W., 1993: Contaminant Hydrogeology. Ed Macmillan. New York, USA. p. 50-60.

HEM, J.D., 1985: Study and Interpretation of the chemical characteristics of Natural Water. Geological Survey 3rd ed Water-Supply Paper 2254. Washington D. C. 269 p.

HERRERA, I.I., 1984: Levantamiento semidetallado de suelos de la cuenca del río Achiguate (fase I). Tesis Ing. Agr. Facultad de Agronomía, Universidad de San Carlos de Guatemala. 199 p.

HERRERA, I.I., 1995: Manual de Hidrología. Primera Edición. Facultad de Agronomía Universidad de San Carlos de Guatemala. 223 p.

IIA-DIGI, 1996: Proyecto de Investigación básica para la planificación del manejo de la cuenca experimental del río Itzapa. Informe anual de 1995. Universidad de San Carlos de Guatemala. 57 p.

JICA-INFOM, 1995: Estudio sobre el Desarrollo de las Aguas Subterráneas en el Altiplano Central de la República de Guatemala. Informe principal. Kokusai Kogyo Co., Ltd. Guatemala. s.p.

KOCH, A. & McLEAN, H., 1975: Pleistocene tephra and ash flow deposits in the volcanic highlands of Guatemala. Geol. Soc. Am. Bull., 86. P. 529-541.

MINISTERIO DE AGRICULTURA, ALIMENTACIÓN Y GANADERÍA, 1991: Plan Maestro de riego y drenaje. Documento No. 2, Hidrogeología. DIRYA. Proyecto del PNUD/GUA/88/03. Guatemala. 72 p.

NITTLER, J.B. & BARAHONA, R., 1993: El manejo de cuencas en el proyecto de desarrollo agrícola de Guatemala. Min. Agricultura, Alimentación y Ganadería. Proyecto USAID/GUATEMALA. 92 p.

PACHECO, B.L., 1981: Precipitación Efectiva. Universidad Autónoma de Chapingo, Chapingo, México. 22 p.

PAYNE, B.R., 1981: Isotope Hydrology. Advances in Hydroscience. Vol. 8, p. 95-138.

PENMAN, L., 1984: Natural evaporation from open water, bare soil and grass. Proceedings Royal Soc. Series A. Vol 193. p. 120 - 145.

SANDERS, L. L., 1998: A Manual of Field Hidrogeology. Northeastern Illinois University. Prentice Hall. Upper Saddle River, New Jersey. United States of America. 381 p.

SANTOS, M.E., 1997: Simulación Hidrológica para la calibración de Parámetros de escorrentía, mediante el modulo HBV del MIKE 11 en la cuenca del río La Virgen, San Andrés Itzapa, Chimaltenango. Tesis Ing. Agr. Facultad de Agronomía, Universidad de San Carlos de Guatemala. 49 p.

WILCOX, L. V., 1948: The quality of water for irrigation use. Dept. Agric. Tech. Bull. 962. Washington D.C. 40 p.

TRISTEZA DEL AGUACATE (*PHYTOPHTHORA CINNAMOMIRANDS*)

José Humberto Calderón Díaz



Resumen

El hongo *Phytophthora cinnamomi*, causante de la tristeza del aguacate, se ha convertido en un obstáculo para desarrollar la industria del aguacate en varios países tropicales y subtropicales; por lo que el conocimiento de la enfermedad es necesario. En este artículo para controlar la enfermedad se sugiere: sanidad e higiene, control cultural y biológico, patrones resistentes y control químico. Se concluye que el mejoramiento de las condiciones del cultivo de aguacate y el uso de microorganismos antagónicos podría ser una alternativa en el manejo integrado de la tristeza del aguacate. También se considera que la utilización de ingeniería genética puede contribuir a controlar el *P. cinnamomi* en el aguacate, especialmente en la producción de agentes biológicos y la posibilidad de introducir genes de resistencia a partir de relativos silvestres de aguacate.

INTRODUCCIÓN

Existen evidencias de que el hongo *Phytophthora cinnamomi* Rands es originario de África del Sur y de Asia y no es un microorganismo natural del continente americano [Zentmyer, 1978]. Existen otras enfermedades del suelo que afectan al aguacate, pero la más importante es la especie *P. cinnamomi* que causa la tristeza del aguacate. Esta enfermedad fue reportada por primera vez por Rands en 1922 como la causante de problemas en canela en Sumatra. En 1927 fue identificada en Puerto Rico y síntomas de tristeza fueron reportados en California en 1950. Este hongo fue aislado de árboles enfermos por primera vez en California en 1942 por Wager [Zentmyer, 1976].

Esta enfermedad ha sido reportada alrededor de todo el mundo especialmente en regiones de clima cálido-templado y en el trópico y subtrópico. Este patógeno se ha convertido en un factor limitante en la industria del aguacate en varios países tropicales y subtropicales, por ejemplo en California miles de árboles han sido eliminados.

Factores como la temperatura, pH y humedad del suelo son importantes en el desarrollo de la enfermedad. Este hongo presenta diferentes formas de esporas que le permite desarrollarse y sobrevivir. Este patógeno produce esporangias que producen zoosporas que tienen movilidad, clamidosporas (no tiene movilidad, estructura de sobrevivencia y sirve de inóculo inicial) y oosporas que tienen una pared gruesa que generalmente se forman como resultado de la fusión de dos diferentes tipos del hongo.

Este patógeno se ha convertido en un factor limitante en la industria del aguacate en varios países tropicales y subtropicales, por ejemplo en California miles de árboles han sido eliminados.

Una muerte gradual del árbol es un síntoma común de la enfermedad. Generalmente las hojas infectadas son pequeñas y pálidas, existe clorosis y amarillamiento de las hojas. Bajo condiciones de sequía o falta de riego, las hojas pierden turgencia y empiezan a mostrar los síntomas de marchitamiento.

Bajo condiciones de sequía o falta de riego, las hojas pierden turgencia y empiezan a mostrar los síntomas de marchitamiento.

DESCRIPCIÓN DE LA ENFERMEDAD

La pudrición de las raíces causada por *P. cinnamomi* produce una muerte descendente gradual del árbol. Las hojas pálidas y marchitas se caen rápido. Las puntas de crecimiento sufren de muerte descendente y el árbol al final se observa con ramas sin hojas. El crecimiento nuevo está ausente o en forma esporádica produciendo hojas que no alcanzan su desarrollo total. La muerte del árbol puede tomar pocos meses o varios años. Las ramas en proceso de muerte descendente puede llegar a producir gran cantidad de pequeños frutos. Cuando la floración ocurre, el árbol generalmente pierde todas sus hojas debido a que todos las raíces absorbentes han muerto.

Las raíces presentan una coloración negra y necrosis, las cuales son pocas comparadas con árboles sanos; y en estados avanzados de la enfermedad es difícil encontrar raíces blancas que se encargan de la absorción de nutrientes. La existencia de cáncer puede observarse a nivel del tronco del árbol. Exudaciones blancas generalmente son asociadas con este tipo de cáncer las cuales se convierten en cristales de algún tipo de azúcar. Dos factores son esenciales para el desarrollo de esta enfermedad, primero, la

presencia del hongo *P. cinnamomi* y segundo el exceso de humedad en el suelo que favorece el desarrollo rápido del hongo y la infección de las raíces [Zentmyer, 1976; Pegg, 1991].

FUENTE DE INFECCIÓN Y DISPERSIÓN

La producción de esporangios es estimulada por microorganismos del suelo, especialmente por bacterias.

Este hongo sobrevive en el suelo como clamidospora en las raíces podridas del árbol. Estas esporas son liberadas dentro del suelo donde puede persistir por varios años. Éstas germinan produciendo una gran cantidad de tubos germinativos. La producción de esporangios es estimulada por microorganismos del suelo, especialmente por bacterias. La producción de esporangios y clamidosporas ocurre en el suelo entre 10 a 29 °C, siendo la óptima entre 21 a 24 °C. Cada esporangio germina produciendo entre 10 a 30 zoosporas que son móviles. Estas zoosporas tienen la capacidad de convertirse en quistes esféricos, los cuales germinan y pueden infectar el sistema radical del aguacate en forma rápida y produce una pudrición de coloración negra.

El papel que juegan las oosporas todavía se desconoce. Esta estructura se mantiene latente y sobrevive bajo condiciones adversas, lo cual la convierte en un tipo de spora bastante persistente. Alta humedad en el suelo proporciona agua libre que favorece la liberación de zoosporas por el esporangio [Coofey, 1991; Zentmyer, 1980]. Este patógeno puede ser dispersado a través de la introducción de material de propagación de lugares donde la enfermedad se encuentra en forma latente o no está ocurriendo al momento de selección del material [Coffey, 1987a].

MANEJO INTEGRADO DE LA TRISTEZA DEL AGUACATE

Varios aspectos de manejo integrado del *Phytophthora* se podrían utilizar. La mejor posibilidad es la combinación de varias estrategias para prevenir o manejar adecuadamente el efecto de esta enfermedad. Para el manejo de prácticas de control para esta enfermedad se deben de incluir lo siguiente: sanidad e higiene, control cultural y biológico, patrones resistentes y control químico.

Sanidad e higiene

Producir aguacate en áreas libres de *Phytophthora* es de vital importancia. Medidas de higiene han sido desarrolladas para reducir la infección a nivel de vivero. Kotze y Darvas [1983], Coffey [1987b] reportan que las medidas de higiene a nivel de vivero se vienen utilizando en África del Sur y California respectivamente. Factores determinantes a nivel de vivero son la esterilización con vapor de agua o la fumigación con químicos del suelo y los medios de propagación. Las mezclas de suelo que se utilizan deben tener buena aireación y un buen drenaje. Agua caliente también se puede utilizar (30 minutos a 48-52°C) para semilla que se utilizará en la propagación. Los viveros tienen que estar ubicados en suelos bien drenados y fuera del riesgo de ser inundados.

Restricciones de ingreso al vivero deberán ser implementadas y todo tipo de calzado deberá ser limpio y desinfectado con un material biocida que generalmente use sulfato de cobre. Todo material

*Para el
manejo
de prácticas
de control
para esta
enfermedad
se deben de
incluir lo
siguiente:
sanidad e
higiene,
control
cultural y
biológico,
patrones
resistentes y
control
químico.*

vegetativo debe ser sujeto a desinfección con fungicidas. Barreras físicas entre el vivero y otro tipo de vegetación pueden construirse. A pesar de todos estos esfuerzos de parte de productores de aguacate, la *Phytophthora* ha seguido su dispersión. Lo anterior ha ocurrido principalmente por dos factores, primero, a que productores de plantas de viveros producen y venden plantas enfermas (con conocimiento o desconocimiento de la presencia de la enfermedad) y segundo, la enfermedad se ha dispersado a través de las actividades diarias que se realizan de una finca productora de aguacate a otras áreas productoras debido a las actividades de manejo similares que se realizan y especialmente las actividades de cosecha [Coffey, 1987a; 1987b; 1987c; Kotze y Darvas, 1983].

Control cultural y biológico

El método de siembra en camellones ha tenido un efecto positivo en el crecimiento de árboles jóvenes.

Los métodos culturales juegan un papel importante en el establecimiento de patrones clonales. El método de siembra en camellones ha tenido un efecto positivo en el crecimiento de árboles jóvenes. Este ha venido siendo usado en suelos con contenidos livianos de arena con resultados positivos. Las prácticas de riego tienen un papel crítico más que otros factores. Intervalos largos de riego pueden reducir la infección por *Phytophthora*. Un régimen de riego que optimice las condiciones de humedad del suelo para un crecimiento del sistema radical deseable combinado con un patrón resistente incrementa el control de *Phytophthora*.

La incorporación de materia orgánica al suelo antes del establecimiento del cultivo es una práctica común en Australia para incrementar los enemigos naturales de la *P. cinnamomi*. También, productores

de California han empezado a utilizar esta práctica incorporando desechos de cosecha al suelo y utilizan el estiércol de polio como material para controlar la pudrición de raíces y que a la vez reduce el costo por agua debido a que las frecuencias de riego son menores [Coffey, 1987a].

El control biológico es una práctica reciente que provee un forma viable del control de enfermedades del suelo. En algunas áreas con aguacate en Australia el control biológico es actualmente una realidad [Cook y Baker, 1983]. Actividades como la siembra de leguminosas con maíz, la aplicación de abonos orgánicos, la incorporación de abonos verdes y la corrección de pH del suelo permite el desarrollo de una gran cantidad de antagonistas biológicos de *P. cinnamomi*. Casalex [1990] reporta que algunos suelos en California presentan propiedades supresivas a *P. cinnamomi* en experimentos realizados a nivel de invernadero y parece ser que los componentes biológicos juegan un papel importante en la supresión de la enfermedad. You et al. [1996] encontró que microorganismos del tipo actinomicetes en materia orgánica tenían la habilidad de suprimir *P. cinnamomi*, pero algunas cepas fueron dañinas al crecimiento de la planta y además otras cepas presentaron diferencias en su capacidad para suprimir a este patógeno. You y Sivasithamparam [1994] reportan que la actividad microbial en abono orgánico usado en aguacate cambia a través del tiempo y la temperatura, pH y contenido de humedad tienen una correlación positiva en los niveles de infección por *P. cinnamomi*.

Duvenhage y Kotze [1993] controlaron la colonización de *Phytophthora* en las raíces utilizando tres aislados de hongos y dos bacterial mezclándolos en el medio de propagación con *P. cinnamomi* a nivel

El control biológico es una práctica reciente que provee un forma viable del control de enfermedades del suelo.

de producción de vivero. Duvenhagex et al. [1991] reporta que actinomicetes y bacterial que forman esporas son mas antagonisticos a *P. cinnamomi* en plantaciones de aguacate del África del Sur que otro grupo de hongos. El efecto de los suelos supresivos para el control de *P. cinnamomi* y de bacterial han sido reportados en África del Sur [Duvenhage y Maas, 1990; Mass y Kotze, 1990]. Stirling et al. [1992] encontraron defectos antagonisticos a *P. cinnamomi* de tres tipos de pseudomonas fluorescentes y nueve actinomicetes en pruebas realizadas *in vitro*.

Patrones resistentes

La mejor solución para controlar la tristeza del aguacate es la utilización de patrones resistentes o tolerantes a la Phytophthora.

La mejor solución para controlar la tristeza del aguacate es la utilización de patrones resistentes o tolerantes a la *Phytophthora*. Coffey [1987a; 1987c], Kotze y Darvas [1983], Menge et al. [1992] y Ruiz-Rosado et al. [1992] reportan que el Duke 7 presenta algún tipo de tolerancia a *P. cinnamomi* y actualmente es utilizado en sistemas de producción comercial.

El cultivar Duke es de origen mexicano y es tolerante al frío. Este material es propagado clonalmente. El G6, que es una selección de Guatemala, también presenta algún tipo de resistencia a nivel de campo a *P. cinnamomi* comparable a Duke 7. Esta selección de Guatemala ha sido propagada y utilizada como patrón, presentando una alta heredabilidad de resistencia mejor que la observada en el Duke 7 [Coffey, 1987a]. En 1984, los patrones G755a, G755b y el G755c que son selecciones de Guatemala fueron liberados por primera vez por un viverista en California y todos son conocidos como «Martín Grande». Estos materiales presentan una resistencia superior contra

la tristeza que el G6 y el Duke 7 [Coffey, 1987a; 1987c]. Niveles de resistencia han sido caracterizados en plántulas de *Persea schiedeana*, pero la producción de semilla es bastante rara y es difícil de poder mantener su viabilidad. La utilización de yemas como alternativa para injerto es posible, pero son difíciles de obtener y poder injertarlas [Coffey, 1987a; 1987c].

Otros patrones como el G810, G1033 y G1350 han sido evaluados y presentan resultados promisorios a nivel de experimentos de campo [Coffey, 1987a; 1987c; Duvenhage, et al. 1991]. Dos nuevos patrones, el Barr Duke (tercera generación de la línea Duke 6) y el Thomas (patrón originado del Fuerte), ambos tipo mexicano, están siendo evaluados y se espera que sean superiores en resistencia a la tristeza que el «Martín Grande» [Coffey, 1987b; 1987c; Menge, et al. 1992]. Otros materiales como el Toro Canyon, G1033, G1008, Parida Series, Huntale y Borchard, también están siendo evaluados en California [Coffey, 1987c; Menge, et al. 1992].

Fungicidas

El control químico de la tristeza del aguacate ha sido utilizado en el pasado y, en el presente todavía es una importante alternativa en combinación con patrones resistentes. Zentmyer [1973] reporta que el sulfanato de p-dimetil-aminobenceno sódico (Dexon) controla la pudrición de raíces en plántulas a nivel de invernadero y en condiciones de campo. Progresos significativos se han logrado con nuevos fungicidas como el ethazol, pyroxyfur (Dowco 444), Metalaxil y fosetil-AI [Zentmyer, 1980; Darvas, 1983; Snyman, 1982]. Inicialmente el Metalaxil tuvo un gran éxito

El control químico de la tristeza del aguacate ha sido utilizado en el pasado y, en el presente todavía es una importante alternativa en combinación con patrones resistentes.

en el control de la pudrición de las raíces, pero su eficacia ha declinado debido al (desarrollo de resistencia por parte del hongo [Zentmyer, 1973; Darvas y Becker, 1984]. El fosetil-AI (Aliette-AI) y el fosfito de potasio (ácido fosforoso nivelado a un pH de 6.2 con hidróxido de sodio (KOH)) son utilizados en aspersiones foliares, pero, el fosetil-AI es un producto mas seguro que el fosfito de potasio cuando se utiliza en aspersiones foliares. También, ambos son usados para inyecciones a nivel del tronco, teniendo el fosfito de potasio la ventaja de ser barato y eficaz y además no es tóxico para plantas y animales [Coffey, 1987a]. Darvas et al. [1984] encontraron que el fosetil-al realizaron un control excelente de *Phytophthora* a través de inyecciones en árboles de aguacate y no presentó síntomas de fitotoxicidad. También encontraron que el Metalaxil y el pyroxyfor no fueron efectivos en el control de esta enfermedad.

La
concentración
que es
requerida
inclusive se ve
reducida y la
protección
del sistema
radicular
puede ser
alcanzado en
relación la
interacción del
complejo
patógeno-
hospedero.

Young et al. [1992] reporta que la flexibilidad en la modalidad de la aplicación del fosetil-al a nivel foliar, inyectado y pintado a nivel tronco es eficaz debido a que el mismo puede ser transportado en el floema y xilema del árbol. Además el vigor y la sanidad del árbol se ve incrementado. Whiley et al. [1992; 1995], Guest et al. [1995] y Duvenhage [1994] sugieren que la época de la aplicación de la inyección a nivel del tronco de productos fosfatados en el aguacate incrementa la eficiencia en la translocación del fungicida a las raíces. La concentración que es requerida inclusive se ve reducida y la protección del sistema radicular puede ser alcanzado en relación la interacción del complejo patógeno-hospedero. Duvenhage [1994] reporta que no ha encontrado ninguna resistencia por parte de la *Phytophthora*

al fosetil-AI y al ácido fosforoso (H_3PO_3), pero un continuo monitoreo es recomendable.

CONCLUSIONES

La posibilidad de encontrar un solución durable en el manejo de *P. cinnamomi* en el aguacate sería a través de un método de control integrado. Productores e investigadores tienen que trabajar juntos para el desarrollo de esta alternativa. La utilización de patrones resistentes como el «Martín Grande» (G755) y adecuado uso de fungicidas como el Metalaxil y el fosetil-AI pueden combatir el problema por el momento. Pero, al mismo tiempo, más investigación deberá realizarse en la búsqueda de material resistente, especialmente de líneas que produzcan semillas, lo cual reduciría los costos de producción a nivel de vivero.

Hay que tener claro que patrones resistentes no resolverían completamente el problema, porque algunos de ellos podrían ser susceptibles a otras enfermedades o presentar características hortícolas no deseables que afecten la calidad. También es posible que este hongo pueda producir nuevas razas patogénicas que reduzcan el efecto de la resistencia. Los fungicidas deben ser utilizados en una forma cuidadosa de manera de evitar la resistencia a los mismos. El mejoramiento de las condiciones del cultivo y el uso de microorganismos antagónicos podría ser una alternativa en el manejo integrado de esta enfermedad.

La utilización de ingeniería genética como una alternativa para el control de *P. cinnamomi* en el aguacate tiene un potencial grande, especialmente

El mejoramiento de las condiciones del cultivo y el uso de microorganismos antagónicos podría ser una alternativa en el manejo integrado de esta enfermedad.

en la producción de agentes biológicos y la posibilidad de introducir genes de resistencia a partir de relativos silvestres del aguacate. Hasta el momento, estrategias de control integrado son una alternativa que podría reducir las pérdidas debido a la tristeza y los productores podrían aprender a convivir con la *P. cinnamomi*.

REFERENCIAS UTILIZADAS

- CASALE, W. L. 1990. Analysis of suppressive soils and development of biological control methods for *Phytophthora* root rot of avocado. Calif. Avocado Soc. Yrbk. 74:53-56.
- COFFEY, M. D. 1987a. *Phytophthora* root rot of avocado: an integrated approach to control in California. Plant Dis. 71:1046-1056.
- COFFEY, M. D. 1987. Root rot: New research development. Calif. Grower 11:32, 33-35.
- COFFEY, M. D. 1987. A look at current avocado rootstocks. Calif. Grower 11:1517
- COFFEY, M. D. 1991. Cause and diagnosis: avocado root rot. Calif. Grower 15:17, 22-23. 'of
- COOK, R. J. AND K. F. BAKER. 1983. Why biological control?, p. 1-29. In: The nature and práctica of biological control of plant pathogens. American Phytopathological Society, St. Paul, MN. 539 pp.
- DARVAS, J. M. 1983. Systemic fungicidas applied as trunk paint against root rot of avocados. S. A. Avocado Growers' Assoc. Yrbk. 1983:78
- DARVAS, J. M. and O. BECKER. 1984. Failure to control *Phytophthora cinnamomi* and *Pythium splendens*

with metalaxyl after its prolonged use. S. A. Avocado Growers' Assoc. Yrbk 1984:72-73

DARVAS, J. M., J. C. TOERIEN, and D. L. MILNE. 1984. Control of avocado root rot by trunk injection with phosethyl-AI. Plant Disease 68:691-693

DUVENHAGE, J. A. and E. M. C. MAAS. 1990. The occurrence of soils suppressive to *Phytophthora cinnamomi*. S. A. Avocado Growers' Assoc. Yrbk. 13:55

DUVENHAGE, J. A., J. M. KOTZE, E. M. C. MAAS. 1991. Suppressive soils and biological control of *Phytophthora* root rot. S. A. Avocado Growers' Assoc. Yrbk. 14: 5-11.

DUVENHAGE, J. A. and J. M. KOTZE. 1993. Biocontrol of root rot of avocado seedlings. S. A. Avocado Growers' Assoc. Yrbk. 16:70-72.

DUVENHAGE, J. A. 1994. Monitoring the resistance of *Phytophthora cinnamomi* to phosethyl-AI and H₃PO₃. S. A. Avocado Growers' Assoc. Yrbk. 17:35-37

GUEST, D. L., K. G. PEGG, and A. W. WHILEY. 1995. Control of *Phytophthora* diseases of tree crops using trunk-injected phosphonates. Hort. Rev. 17:299-330

KOTZE, J. M. and J. M. DARVAS. 1983. Integrated control of avocado root rot. Calif. Avocado Soc. Yrbk. 67:83-86.

MASS, E. M. C. and J. M. KOTZE. 1990. The effect of bacteria on root rot severity caused by *Phytophthora cinnamomi*. S. A. Avocado Growers' Assoc. Yrbk. 13:65-66.

MENGE, J. A., F. B. GUILLEMET, S. CAMPBELL, E. JOHNSON, and E. POND. 1992. The performance of rootstocks tolerant to root rot caused by *Phytophthora cinnamomi* under field conditions in southern California. Proc. of Second World Avocado Congress. Pp. 53-59.

- PEGG, K. G. 1991. Causes of disease, P. 1-2. In: R. H. Broadley (ed.). Avocado pests and disorders. Queensland Department of Primary Industries. Brisbane, Australia.
- RUIZ-ROSADO, M., L. J. LIU, F. FERWERDA, and A. AROCHO. 1992. Assessments on the resistance of avocado rootstocks to *Phytophthora cinnamomi* in Puerto Rico. Proc. of Second World Avocado Congress. Pp. 67-68.
- SNYMAN, C. P. 1982. Die evaluasie van swammiddels teen avokadowortelvrot. S. A. Avocado Growers' Assoc. Yrbk. 1982:85-93.
- STIRLING, A. M., A. C. HAYWARD, and K. G. PEGG. 1992. Evaluation of the biological control potential of bacteria isolated from a soil suppressive to *Phytophthora cinnamomi*. Australasian Plant Pathology. 21:133-142.
- WHILEY, J. W., J. B. SARANAH, P. W. LANGDON, P. A. HARGREAVES, K. G. PEGG, and L. J. RUDDLE. 1992. Timing of phosphonate trunk injections for *Phytophthora* root rot control in Avocado trees. Proc. of Second World Avocado Congress. Pp. 75-78.
- WHILEY, A. W., P. A. HARGREAVES, K. G. PEGG, V. J. DOOGAN, L. J. RUDDLE, J. B. SARANAH, and P. W. LANGDON. 1995. Changing sink strengths influence translocation of phosphonate in avocado (*Persea amencana* Mill.) trees. Austral. J. Agri. Res. 46:1079-1090.
- YOUNG, H. S., B. L. TEPPER, R. T. MERCER, G. PELIZZO, and R. ANELICH. 1992. Phosethyl-AI, a management tool for control of *Phytophthora* root rot. Proc. of Second World Avocado Congress. Pp. 69-74.
- YOU, M. P., K. SIVASITHAMPARAM. 1994. Hydrolysis of fluorescein diacetate in an avocado plantation mulch suppressive to *Phytophthora cinnamomi* and its relationship with certain biotic and abiotic factors. Soil, Biology and Biochemistry. 26:1355- 1361.

- YOU, M. P., K. SIVASITHAMPARAM, K. L. KURTBOKE. 1996. Actinomycetes in organic mulch used in avocado plantations and their ability to suppress *Phytophthora cinnamomi*. *Biology and Fertility of Soils* 22:237-242.
- ZENTMYER, G. A. 1973. Control of *Phytophthora* root rot of avocado with pdimethylamino benzenediazosodium sulfanate (Dexon). *Phytopathology* 63:267-272.
- ZENTMYER, G. A. 1976. Soil-borne pathogens of avocado, p. 75-82. In: J. W. Sauls, R. L. Phillips, and L. K. Jackson (ads.). *Proceedings of the first international tropical fruit short course: the avocado*. University of Florida. Gainesville, Florida.
- ZENTMYER, G. A. 1978. Origin of *Phytophthora cinnamomi*: evidence that is not an indigenous fungus in the Americas. *Phytopathology* 67:1373-1377.
- ZENTMYER, G. A. 1980. *Phytophthora cinnamomi* and the diseases it causes. Monograph 10. Amer. Phytopathol. Soc. St. Paul, MN. 96 pp.

Los Autores

Lesbia A. Calderón Aguirre

Médica Veterinaria, Profesional de Vigilancia Epidemiológica de la Coordinación Departamental del Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación en Zacapa, Guatemala.

José Humberto Calderón Díaz

M. Sc. Profesor titular de la Facultad de Agronomía de la Subárea de Protección de Plantas.

Isaac Rodolfo Herrera Ibáñez

Ing. Agr. Profesor de la Facultad de Agronomía, Universidad de San Carlos de Guatemala. Especialista en Geología.

Carlos Orozco Castillo

PhD. Ing. Agr. de la Sub-área Manejo y Mejoramiento de Plantas de la Facultad de Agronomía, Universidad de San Carlos de Guatemala.

Ariel Abderraman Ortiz López

PhD. Profesor de la Facultad de Agronomía, Universidad de San Carlos de Guatemala. Ing. Agr. de la Sub-área de Comercialización Agrícola de la Facultad de Agronomía, Universidad de San Carlos de Guatemala.

Mamerto Reyes Hernández

M. Sc. en Economía Agrícola. Profesor de la Subárea de Comercialización y Administración Agrícola de la Facultad de Agronomía, Universidad de San Carlos de Guatemala.

Ricardo Shirota

Profesor del Departamento de Economía y Sociología Rural de la Escuela Superior de Agronomía "Luz de Queiroz", Universidad de Sao Paulo, Brasil.