

00381



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MEXICO

---

**POSGRADO EN CIENCIAS  
BIOLÓGICAS**

**FACULTAD DE CIENCIAS**

**LA EROSIÓN EN LA SIERRA DE LA LAGUNA,  
BAJA CALIFORNIA SUR**

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE  
DOCTORA EN CIENCIAS ( BIOLOGÍA )

**P R E S E N T A**

**YOLANDA LOURDES MAYA DELGADO**

**DIRECTORA DE TESIS: DRA. LAURA BLANCA ARRIAGA CABRERA**

MEXICO, D. F.

SEPTIEMBRE 2004



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**ESTA TESIS NO SALE  
DE LA BIBLIOTECA**

Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas de la UNAM a difundir en formato electrónico e impreso el contenido de mi trabajo recepcional.

NOMBRE: YOLANDA LOURDES

RAYA DELGADO

FECHA: 6/08/04

FIRMA: p.g. Rayadelgado

A mis padres

A Rafael

A mis hermanos

A mis amigos

A los que siempre están  
conmigo, aunque no los perciba.

## **AGRADECIMIENTOS**

A las Dras. Laura Arriaga Cabrera y Marie-Françoise Passini, por su asesoría.

Al Dr. Alejandro López Cortés, por haber trabajado codo a codo conmigo, por su confianza en mí y por su entusiasmo, que permitió que me re-encontrara con el fascinante mundo de la Microbiología.

Muy especialmente a la Dra. Margarita Collazo Ortega. En principio por su interés en los estudiantes del CIBNOR. Personalmente por su amistad y su invaluable apoyo, que nunca podré agradecer en lo que vale.

A Franco Cota, Reymundo Domínguez, Amado Cota y Abelino Cota, no sólo por su valiosa y eficiente ayuda en campo, sino por ser los guardianes de nuestra seguridad.

A mis amigos y compañeros Ricardo Rodríguez, Patricia Cortés, César Salinas, Ma. Luisa Jiménez y Sara Díaz, por sus valiosos consejos.

A los Dres. Norma García Calderón, David Flores Román, Gustavo Montejano Zurita y Leopoldo Galicia Sarmiento, por su cooperación en la revisión del manuscrito y su participación como integrantes del jurado dictaminador.

A las autoridades del Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C., por las facilidades y el respaldo que me dieron para la realización de este trabajo.

Al personal de los laboratorios de Edafología, de Espectrofotometría de Absorción Atómica y de Cromatografía del CIBNOR, por su colaboración en la obtención de muchos de los resultados de este estudio.

Y finalmente a todos aquellos que de alguna u otra forma colaboraron en la culminación de este proyecto.

**"Le désert menace toujours, plus ou moins  
évidemment, mais il est toujours présent, à l'état  
embryonnaire, dans la saison sèche et chaude"**

**Aubreville, 1949**

## RESUMEN

El estudio trata sobre la erosión de los suelos en La Sierra de la Laguna, ubicada en el sur de la Península de Baja California. Se produjeron dos interesantes resultados: (1) que la erosión es consecuencia de las actividades humanas, particularmente la ganadería extensiva, no de factores naturales y (2) que algunos microorganismos nativos podrían contribuir positivamente en la calidad del suelo.

En la primera parte se hace un diagnóstico de los suelos de la sierra, una estimación del área afectada y se analiza la evolución de la erosión a través del tiempo por medio de herramientas de Percepción Remota. En 1996 cerca del 5% de la superficie total de la sierra se encontraba erosionada, ubicándose las áreas más afectadas dentro de la selva baja caducifolia, en la que se desarrollan varias actividades económicas. También se estimaron incrementos de hasta 100% de superficie erosionada en 18 años, sobre todo en el norte, en la región transicional entre el Desierto Sonorense y la más tropical Región del Cabo.

En la segunda parte se analiza si las actividades humanas han fomentado la erosión por medio de un experimento de exclusión a la ganadería y por el análisis de imágenes en SIG. Se encontró que tienen más influencia las actividades asociadas a la ganadería extensiva, tales como la construcción de infraestructura, caminos y ranchos, que el pastoreo directo.

La tercera parte evalúa, mediante estudios experimentales, características de cianobacterias de cortezas microbióticas que crecen en forma natural sobre los suelos erosionados en la región de estudio. Los resultados demostraron que algunos grupos de cianobacterias nativas podrían tener cualidades como biomejoradores, abriendo expectativas para ser usadas en la recuperación de suelos erosionados.

## ABSTRACT

This study evaluated soil erosion in the Sierra de la Laguna, a mountain range located near the tip of the Baja California Peninsula. The study produced two interesting results: (1) Soil erosion is a consequence of human activities, particularly cattle ranching, not natural factors, and (2) Some native soil microorganisms have characteristics that would positively contribute to soil quality.

The first part of the study evaluates the soils of the mountain range, estimating the size of the affected area, and analyzing the evolution of soil erosion over time by means of remote sensing tools. In 1996, about 5% of the surface within the Sierra was eroded, the most affected areas located into the tropical dry forest, where many economic activities are developed. Besides, increments in eroded surfaces of over 100% in 18 years were estimated in the northern area, which is transitional between the Sonoran Desert vegetation and the subtropical Cape Region.

The second part analyses the relation between human activities and soil erosion by comparing areas of grazing exclusion with exploited areas and by GIS and remote sensing image analyses. Activities associated with cattle ranching (opening of roads and construction of farms and infrastructure) were determined to be more important than direct grazing.

The third part evaluates experimental studies of the characteristics of cyanobacteria in microbiotic crusts growing naturally on eroded soil surfaces in the study region. Results show that some native cyanobacteria have characteristics that suggest an important role as soil bio-improvers. This raises expectations that these microorganisms can be used in recovering programs of eroded soils.

## CONTENIDO

|  | Pág. |
|--|------|
| 1. INTRODUCCION GENERAL  | 1    |
| 2. ANTECEDENTES  | 4    |
| 3. EVALUACION DEL AREA AFECTADA Y EVOLUCION DEL FENOMENO   | 8    |
| 3.1 Introducción   | 8    |
| 3.2 Objetivos  | 10   |
| 3.3 Materiales y Métodos   |      |
| 3.3.1 Diagnóstico general de los suelos de la Sierra de la Laguna  | 10   |
| 3.3.2 Inventario del área afectada   | 11   |
| 3.3.3 Análisis de la evolución del fenómeno (1978-1996)  |      |
| a) Selección de áreas representativas de las diferentes condiciones de erosión del suelo   | 12   |
| b) Generación de los mapas de erosión de las dos fechas (1978 – 1996)  | 16   |
| 3.3.4 Tendencias del índice de aridez en las localidades más afectadas   | 17   |
| 3.4 Resultados   |      |
| 3.4.1 Diagnóstico general de los suelos de la Sierra de la Laguna  | 18   |
| 3.4.2 Inventario del área afectada   | 18   |
| 3.4.3 Análisis de la evolución del fenómeno (1978-1996)  | 19   |
| 3.4.4 Tendencias de los índices de aridez en las localidades más afectadas   | 27   |
| 3.5 Discusión y Conclusiones   | 27   |
| 3.5.1 Inventario del área afectada   | 27   |
| 3.5.2 Análisis de la evolución del fenómeno (1978-1996)  | 29   |
| 3.5.3 Tendencias de los índices de aridez en las localidades más afectadas   | 30   |
| 4. IMPACTO ANTROPOGENICO vs. FACTORES NATURALES  | 32   |
| 4.1 Introducción   | 32   |
| 4.2 Objetivos  | 35   |
| 4.3 Materiales y Métodos   |      |
| 4.3.1 Análisis del impacto de la ganadería en las propiedades físicas y químicas del suelo   | 35   |
| 4.3.2 Relación de áreas afectadas y ubicación de los ranchos y caminos de acceso   | 36   |
| 4.3.3 Tasas de erosión con base en el modelo USLE (Universal Soil Loss Equation); análisis espacial de la erosión potencial y su correspondencia con las zonas erosionadas en 1996 | 37   |
| 4.4 Resultados   |      |
| 4.4.1 Análisis del impacto de la ganadería en las propiedades físicas y químicas del suelo   | 40   |
| 4.4.2 Relación de áreas afectadas y ubicación de los ranchos y caminos de acceso   | 42   |
| 4.4.3 Tasas de erosión con base en el modelo USLE; análisis espacial de la erosión potencial y su correspondencia con las zonas erosionadas en 1996                                | 47   |

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 4.5   | Discusión y Conclusiones   |    |
| 4.5.1 | Análisis del impacto de la ganadería en las propiedades físicas y químicas del suelo   | 51 |
| 4.5.2 | Relación de áreas afectadas y ubicación de los ranchos y caminos de acceso   | 54 |
| 4.5.3 | Tasas de erosión con base en el modelo USLE; análisis espacial de la erosión potencial y su correspondencia con las zonas erosionadas en 1996. | 55 |
| 5.    | DESCRIPCION DE LA NATURALEZA MICROBIANA DE SUELOS EROSIONADOS DE LA SIERRA DE LA LAGUNA  | 57 |
| 5.1   | Introducción   | 57 |
| 5.2   | Materiales y Métodos   |    |
| 5.2.1 | Area de estudio  | 61 |
| 5.2.2 | Muestreo y reactivación de las cortezas  | 61 |
| 5.2.3 | Identificación de los morfotipos de cianobacterias   |    |
|       | a) Microscopía   | 62 |
|       | b) Aislamiento y cultivo   | 63 |
|       | c) Microscopía electrónica de barrido (SEM)  | 64 |
|       | d) Fijación de nitrógeno   | 64 |
| 5.3   | Resultados   |    |
| 5.3.1 | Identificación de los morfotipos   | 65 |
| 5.3.2 | Microscopía electrónica de barrido   | 72 |
| 5.3.3 | Fijación de nitrógeno  | 73 |
| 5.4   | Discusión y Conclusiones   |    |
| 5.4.1 | Composición cianobacteriana de las cortezas  | 73 |
| 5.4.2 | Erosión  | 74 |
| 5.4.3 | Fijación de nitrógeno  | 75 |
| 6.    | DISCUSION GENERAL  |    |
| 6.1   | Diagnóstico de la Sierra de la Laguna – Impacto antropogénico  | 78 |
| 6.2   | El modelo de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo   | 80 |
| 6.3   | La cartografía analógica vs. el aspecto práctico de su incorporación en las nuevas herramientas de análisis espacial                           | 81 |
| 6.4   | Las cianobacterias como elementos biológicos mejoradores del suelo   | 83 |
| 6.5   | Perspectivas de los procesos erosivos en la Sierra de la Laguna a corto, mediano y largo plazo.  | 84 |
| 7.    | CONCLUSIONES   | 87 |
| 8.    | REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS   | 88 |

## 1. INTRODUCCION GENERAL

El suelo constituye uno de los recursos primordiales de los ecosistemas terrestres. Es un recurso natural que podría considerarse como no renovable, dado el lento proceso de su formación, que toma de cientos a varios miles de años. Las diversas actividades humanas, al ejercer presiones más o menos intensas sobre la vegetación, favorecen la degradación y pérdida de las capas superficiales del suelo.

La erosión se define como el denudamiento de la superficie de la tierra. Ocurre como un fenómeno natural en todos los ambientes a diferentes tasas de desarrollo, en una escala geológica. Las tasas naturales –o erosión geológica- pueden ser súbitamente alteradas por eventos tales como temblores, fuertes tormentas, sequía severa, por influencia humana o por la combinación de ellos. Cuando la remoción de material edáfico ocurre en tasas superiores a las de su formación, se habla de erosión acelerada la cual, como su nombre lo indica, es rápida y no permite que la vegetación pueda restablecerse. Es un fenómeno gradual que causa el deterioro del suelo, pudiendo llegar hasta su eliminación total (Barrow 1991, Field y Engel 1997). La erosión es un fenómeno conformado por dos procesos: el desprendimiento de las partículas y su transporte por el agente erosivo, que puede ser el viento (erosión eólica) o el agua (erosión hídrica). El principal agente erosivo en el caso de la erosión hídrica son las gotas de lluvia (Figuroa *et al.* 1991).

La erosión hídrica se inicia cuando la energía de las gotas de lluvia rompe los lazos que unen las partículas de la superficie del suelo; esta energía puede ser suficiente para transportar las partículas lejos del sitio del que se desprendieron. Al salpicar, las gotas de lluvia desplazan las partículas de suelo en forma radial al sitio de desprendimiento. Si el suelo no tiene pendiente, el material salpicado es reemplazado por material salpicado del área circundante, en tanto que en suelos con pendiente son más las partículas salpicadas pendiente abajo que las que se salpican pendiente arriba, resultando en una migración neta hacia abajo del material desprendido. Hasta este punto, el transporte de partículas es un proceso limitado (Kinnell *et al.* 2001). Se inicia entonces el escurrimiento el cual, al aumentar su velocidad de flujo y concentrarse en pequeños canalillos, tiene la capacidad de desprender y transportar el material suelto. Cuando la lámina de agua es delgada, las gotas de lluvia pueden penetrarla y desprender nuevas partículas, que pasan a formar parte del mismo flujo. En este momento el efecto abrasivo de las partículas

semisuspendidas es capaz de remover más y más partículas. En función del escurrimiento y la pendiente, el transporte en este caso es un proceso ilimitado (Kinnell *et al.* 2001).

Las propiedades del suelo que están involucradas en el proceso son la textura, el tamaño y la agregación de las partículas (Kirkby y Morgan 1984, Schwab *et al.* 1990, Field y Engel 1997). Por sus propiedades fisico-químicas, la materia orgánica es esencial en la agregación de las partículas, además de jugar un papel muy importante en la dinámica del suelo, ya que es la fuente de energía y de nutrientes de los microorganismos del suelo, que son los responsables de los ciclos biogeoquímicos de los ecosistemas terrestres. El decremento de materia orgánica en un suelo estable puede tener como importantes consecuencias la eliminación de algunos ciclos y la disminución en la retención de humedad y de nutrientes (Degens 2001).

Entre los microorganismos del suelo que promueven activamente la agregación se encuentran las bacterias, que producen polisacáridos que pegan las partículas entre sí, en tanto que el micelio de los hongos y actinomicetos forman macroagregados. Al promover la agregación, los microorganismos intervienen colateralmente en el drenaje del suelo y su aireación (Hartmann *et al.* 1997, Degens 2001, Fließbach *et al.* 2001).

Además de la participación activa de los microorganismos, en la agregación de las partículas son importantes la naturaleza del material parental, los procesos físicos y bioquímicos que se producen en la síntesis de las arcillas y el humus, el clima, las sales solubles y la migración de arcillas, de óxidos de hierro y de carbonatos (Luk 1979), e incluso el tamaño y distribución de las raíces (Schwab *et al.* 1990).

Otros factores importantes que contribuyen a la erosión hídrica son la geomorfología, la topografía y la cobertura vegetal. La cantidad de suelo que puede perderse de un área determinada depende tanto de la inclinación como de la longitud de la pendiente y de los obstáculos que se presenten, por lo que en pendientes abruptas, desprovistas de obstáculos, con lluvias torrenciales y escasa vegetación se espera que la pérdida de suelo sea extrema. La eliminación de la cubierta vegetal del suelo por causas diversas, como por ejemplo tala, apisonamiento por ganado o pastoreo, fomenta la acción mecánica del viento y la lluvia, provocando la pérdida del mantillo y la exposición de las raíces de la vegetación hasta la muerte de los individuos con las raíces expuestas, la pérdida del banco de semillas y el aumento progresivo del área de suelo desnudo (Westoby 1980, Saunders y Young 1983). El clima determina el tipo de vegetación natural, ya que de él depende que la cubierta vegetal sea densa y

perenne en los ambientes húmedos y escasa y caducifolia en los ambientes áridos. Ya sea en condiciones de extrema sequía o de abundante precipitación, el manejo inadecuado es también una causa que desencadena los procesos de erosión.

La desertificación<sup>1</sup> es un problema de gran magnitud de degradación del terreno, que afecta especialmente a las regiones áridas del mundo. Aubreville (1949) definió la desertificación como terrenos productivos que eran transformados en desiertos, como resultado de la destrucción del suelo por la erosión inducida por el hombre. La causa de esta destrucción, decía, era el manejo inadecuado que expone el suelo a la erosión hídrica y eólica. Aunque actualmente se reconoce que la desertificación puede presentarse geográficamente lejos de un desierto climático, las zonas áridas y semiáridas son particularmente sensibles debido a que, actividades que tienen relativamente buenos resultados económicos durante la temporada húmeda, continúan durante la temporada seca rebasando la capacidad de carga, cuando las condiciones extremas de poca precipitación, altas temperaturas y altos índices de radiación incrementan los procesos de degradación (Glantz y Orlovsky 1983, Dregne 1986).

Fue hasta hace pocas décadas que se empezó a dar importancia a la desertificación, debido a que en el pasado atañía sólo a una pequeña población y resultaba relativamente fácil desplazar las actividades productivas a terrenos no afectados. Sin embargo, la disponibilidad de nuevas tierras limitaba esta expansión cada vez más, hasta que se cayó en la cuenta de que el descuido continuado de la degradación de los recursos naturales ponía en riesgo el futuro de la humanidad (Dregne 1986).

La erosión del suelo es un problema que afecta grandes extensiones de tierras agrícolas y forestales a nivel mundial. El problema ha comenzado finalmente a llamar la atención en la justa medida de su importancia, debido básicamente a la reducción en la capacidad de producción de alimentos, aunado a las grandes pérdidas económicas que esto ocasiona. Es por ello que la mayor parte de la investigación se ha desarrollado en áreas sometidas a manejo agrícola y pecuario, siendo relativamente poca la que se ha hecho en áreas forestales con fines de conservación. Este trabajo busca contribuir al conocimiento sobre la erosión del suelo en un ecosistema forestal sometido a diversas presiones derivadas de las actividades humanas, particularmente la ganadería extensiva.

---

<sup>1</sup> En este documento, "desertización" se refiere al proceso que se da por el cambio natural del clima hacia una mayor aridez (Anónimo 1977a), en tanto que el término "desertificación" se utiliza cuando el efecto humano es el factor más importante en el proceso de la pérdida de suelos y de la cubierta vegetal (Anónimo 1977b).

## 2. ANTECEDENTES

La Sierra de la Laguna se localiza en la porción meridional de la Península de Baja California. Su origen geológico se inició en el Mesozoico, cuando una intrusión de rocas graníticas se formó a lo largo de la costa occidental del continente americano. En esa época la península de Baja California aún no existía como tal. Se considera que fue durante el Mioceno Medio (hace 14 millones de años) que el batolito que conforma la Sierra de la Laguna se desprendió del Eje Neovolcánico del macizo continental. Tras múltiples eventos de actividad tectónica y levantamientos orogénicos, se unió definitivamente a la península durante el Pleistoceno, hace aproximadamente 1.8 millones de años (Padilla *et al.* 1988).

La Sierra de la Laguna tiene gran importancia debido a que posee la mayor diversidad biológica de toda la península. En sus laderas bajas se encuentra la selva baja caducifolia que se ha establecido en las condiciones climáticas más extremas de todo el país para este tipo de vegetación (Gentry 1942, Martin *et al.* 1998) y en sus cumbres más altas se encuentran bosques de encino y encino-pino (Passini 1987a, b, Passini y Pinel 1989). Tanto la selva como los bosques son los únicos en todo el estado de Baja California Sur (Arriaga y Ortega 1988). Dentro de estos tipos de vegetación se alberga una importante cantidad de especies y subespecies endémicas, debido al aislamiento que le confiere el estar rodeada de grandes llanuras desérticas (Arriaga y Ortega 1988). Además, es el principal captador de humedad para la región sur del estado, ya que por sus laderas escarpadas se produce el escurrimiento que recarga los mantos subterráneos de la región, principal fuente de abastecimiento de agua (Guertin *et al.* 1988). Con fines de conservación, principalmente del bosque de encino-pino, una amplia región dentro del área boscosa de la Sierra de la Laguna fue decretada Reserva de la Biosfera el 6 de junio de 1994.

Sobre la Sierra de la Laguna se han logrado importantes avances en el conocimiento básico de los recursos naturales, así como sobre su uso y manejo, gracias a diversas investigaciones desarrolladas en el CIBNOR (Arriaga y Ortega 1988, Arriaga y León de la Luz 1989, León de la Luz y Domínguez 1989, Breedlove y León de la Luz 1989, Ortega 1992, Arriaga *et al.* 1993, Breceda 1994, Breceda *et al.* 1994, Breceda *et al.* 1997, Ramírez 2001, Ortiz 2001, entre otros).

Este imponente macizo montañoso, que se eleva abruptamente de la llanura desde los 300 msnm hasta alcanzar los 2090 msnm, representa una superficie limitada naturalmente que puede considerarse como un sistema funcional en el que pueden estudiarse los procesos erosivos. Hasta ahora no se había realizado prácticamente ningún estudio enfocado específicamente a este fenómeno. Morelos (1988) menciona la existencia de áreas relativamente extensas con problemas de erosión, que determinó a través de fotointerpretación. En el mapa de vegetación de la Sierra de la Laguna escala 1:50,000 que muestra los resultados de su análisis, la erosión se encuentra asociada a diferentes tipos de vegetación y no se analiza la proporción de cada elemento, por lo que no es posible hacer una evaluación cuantitativa. Por otra parte Casalegno (2001), en un estudio sobre el ecotono entre la selva baja caducifolia y el bosque de encino realizó una cartografía detallada de las áreas perturbadas a partir de un modelo digital e imágenes de satélite.

Los estudios sobre la erosión del suelo de la Sierra de la Laguna son de gran importancia dado que este fenómeno ya se presenta en algunas localidades dentro de la selva baja caducifolia, la cual se encuentra sometida en la actualidad a la presión de diversas actividades económicas, particularmente la ganadería extensiva. Tales actividades han ocasionado deforestación y ésta, a su vez, un activo proceso erosivo del suelo que ha dado lugar a la disminución de la superficie capaz de infiltrar el agua hacia los mantos freáticos.

De acuerdo con la información recopilada, se ha podido establecer que:

1. La ganadería extensiva de bovinos es una actividad que se ha practicado en la región serrana desde hace alrededor de 400 años, mayormente dentro de la selva baja caducifolia. Aunque se ha calculado que existe sobrepastoreo (Arriaga y Cancino 1992), la capacidad de carga del medio ha estado durante todo el tiempo determinada por la gran estacionalidad de la vegetación. Durante la estación seca los ganaderos se ven obligados a vender los animales al rastro antes de enfrentar la falta de alimento provocada por la sequía.
2. La densidad de población en las inmediaciones de la sierra se ha mantenido prácticamente estable. En algunas poblaciones se ha registrado incluso cierta disminución por un fenómeno de migración que es común sobre todo entre los habitantes más jóvenes, que se dirigen hacia las ciudades cercanas con el fin de trabajar en los servicios de turismo que se encuentran en pleno auge.

3. En la región serrana la mayor concentración humana se localiza en pequeñas poblaciones que se han establecido en sus estribaciones. En la mayoría de ellas la población es menor de 150 habitantes (INEGI 2000). El resto de la población se distribuye en los cerca de sesenta ranchos ganaderos que se encuentran dentro de la selva baja caducifolia. No ha habido problemas de tala inmoderada ni se han abierto nuevos campos para la agricultura.
4. No se practica la explotación comercial de recursos maderables. La extracción de madera se lleva a cabo en forma local y sólo para construir cierta infraestructura que requiere la actividad ganadera que se desarrolla en la región, como techos y cercas (Arriaga y Cancino 1992, Breceda *et al.* 1997).

Hacer una estimación real de la superficie afectada y proporcionar un mayor conocimiento acerca de los diferentes procesos y dinámica que se suceden durante la erosión fue el planteamiento del presente trabajo de investigación. Esta información es indispensable para sustentar estrategias que permitan su control, así como lograr la restauración ecológica de áreas afectadas por deforestación y erosión avanzada.

Con base en lo anteriormente expuesto se espera que:

1. La erosión en la Sierra de la Laguna no se deba principalmente al efecto de variables físico-químicas y biológicas naturales, tales como el clima, el tipo de vegetación, el tipo de suelo y las características fisiográficas del macizo montañoso.
2. Las actividades productivas que se desarrollan dentro de la selva baja caducifolia, particularmente la ganadería extensiva, sean la principal causa de erosión en la Sierra de la Laguna.
3. Las cortezas microbióticas que crecen en la superficie de los suelos erosionados de la Sierra de la Laguna tengan algún efecto sobre la calidad del suelo.

Algunas de las interrogantes planteadas en este trabajo son:

- ¿Qué porcentaje de la Sierra está afectada por la erosión en la actualidad?
- ¿Se han acelerado los procesos erosivos en los últimos años?

- ¿Las áreas afectadas corresponden a las que se esperaría fueran las más afectadas de acuerdo con las condiciones naturales de tipo de suelo, clima, fisiografía y tipo de vegetación?
- ¿existe alguna relación entre la distribución espacial de las áreas afectadas y la ubicación de ranchos, caminos, etc., que son parte esencial de la infraestructura que requiere la ganadería extensiva?
- ¿las cortezas microbióticas de la selva baja caducifolia de la Sierra de la Laguna podrían tener alguna influencia en el control de la erosión?

En los siguientes tres capítulos que conforman esta tesis se trata de dar respuesta a las interrogantes planteadas.

- En el primero se hace una evaluación del área afectada y de la evolución del fenómeno durante un periodo de dieciocho años.
- En el segundo se analizan el impacto de la ganadería sobre las propiedades físico-químicas del suelo y la relación de las actividades humanas con la erosión.
- El tercero aborda el estudio prospectivo de las cortezas microbióticas de cianobacterias con el fin de conocer si contribuyen a mejorar la calidad del suelo.

### 3. EVALUACION DEL AREA AFECTADA Y EVOLUCION DEL FENOMENO

#### 3.1 INTRODUCCIÓN

Los suelos de la Sierra de la Laguna reflejan el efecto de los factores formadores que son predominantes en el macizo montañoso. El material parental, en su mayor parte constituido por rocas graníticas, brinda un elevado contenido de minerales primarios resistentes, como el cuarzo. Coria (1988), con base en la clasificación de Köeppen modificada por García (1973), determinó que el clima varía altitudinalmente desde los semiáridos cálidos BS<sub>0</sub> de las partes bajas y medias hasta el templado subhúmedo C(w<sub>1</sub>) de las cumbres más altas. Tal variación se manifiesta en una gama de aspectos: la poca humedad restringe la formación de arcillas, determina el carácter caducifolio de la selva (Murphy y Lugo 1986), la cual se encuentra en las altitudes medias y bajas de las laderas serranas y el establecimiento de bosques relativamente abiertos de encino y de pino-encino en las partes más altas. Por la característica caducifolia de la selva baja, el aporte de materia orgánica "fresca" se limita a cortos periodos del año, cuya descomposición se reduce a la estación húmeda, única durante la cual la actividad microbiana substancial es posible. Esto no sucede en los suelos que sostienen los bosques de encino y de pino-encino, en donde el efecto de que haya mayor humedad se expresa en contenidos apreciables de materia orgánica. Por otra parte, la meteorización ha actuado durante eras sobre el material geológico del que originalmente era un domo batolítico formado durante el evento térmico del Mesozoico (Padilla *et al.* 1988), confiriéndole un relieve muy escarpado. Además, las fuertes pendientes actúan en contraposición al desarrollo del suelo y dan origen a suelos poco profundos por efecto de la erosión geológica. Todo ello ha determinado que los suelos de la Sierra de la Laguna sean predominantemente poco desarrollados, que tengan un alto porcentaje de arenas y que estén débilmente estructurados (Maya 1988, 1991, 1994), características que los hace sumamente susceptibles a la erosión.

El estudio de los procesos y dinámica de la erosión del suelo en este interesante macizo montañoso requiere el uso de herramientas que permitan, por una parte, realizar el análisis espacial del fenómeno y, por otra, analizar extensiones relativamente grandes de terreno de una manera rápida y confiable.

La Percepción Remota (PR) es una disciplina científica que se basa en que todos los objetos terrestres tienen la propiedad de emitir, difundir o reflejar radiaciones electromagnéticas. Integra los avances más recientes de la investigación espacial, de la física y de la informática,

utilizando esta información para la observación, análisis, interpretación y gestión del medio ambiente a partir de imágenes y registros obtenidos por medio de plataformas aéreas, espaciales, terrestres o marítimas. Dado que sus posibilidades de aplicación aumentan en la medida que se desarrollan las técnicas en las que se apoya, la PR es una poderosa herramienta de gran utilidad para la planificación y el desarrollo económico.

En el estudio de los suelos la PR es una herramienta que mejora ampliamente la eficiencia del análisis del paisaje, es decir, el análisis de indicadores indirectos como la geomorfología, la variación de la vegetación y el uso del suelo. Podría considerarse complementaria ya que los sensores no registran directamente la radiación proveniente de los suelos, sino principalmente la de la vegetación que los cubre (Mulders 1977, Bonn y Rochon 1992, Franklin y Wilson 1992). Sin embargo, en el caso particular de los suelos erosionados, en donde uno de los indicadores principales es la poca o nula cobertura vegetal, la reflectividad registrada por los sensores es en gran parte la del suelo. Es por esta razón que el Índice de Brillo, por ejemplo, puede servir para elaborar mapas confiables de áreas potencialmente erosionadas en condiciones de color de suelo homogéneo y vegetación caducifolia (Maya *et al.* 2004). Otro ejemplo es el estudio de la erosión hídrica en cárcavas en zonas agrícolas templadas (Bocco y Valenzuela 1988, Bocco *et al.* 1990).

A pesar de limitaciones impuestas por el hecho de que los sensores satelitales o aéreos únicamente pueden obtener registros de la capa más superficial del suelo y de que suelos similares se encuentren en diferentes condiciones ambientales, ha sido posible demostrar el uso de imágenes para el mapeo de formas específicas de degradación de suelos, cuando éstas han podido correlacionarse significativamente con características superficiales espectralmente detectables (Hill 1994, Escadafal y Bacha 1996). Hill *et al.* (1994) por ejemplo, analizaron la erosión hídrica laminar en una región boscosa de Francia utilizando características superficiales del suelo tales como la rubificación y la brunificación. Belz *et al.* (1998) por su parte, lograron crear modelos de escurrimiento superficial de una región del norte de Argelia, utilizando patrones de infiltración-escurrimiento en mapas de distribución de la humedad del suelo previa a la precipitación, generados a partir del análisis de imágenes satelitales en SIG.

Por otra parte, la utilización de las imágenes de satélite permite la extrapolación a gran escala de la información obtenida localmente, pudiéndose utilizar tanto en el estudio de los suelos como para implementar estrategias de conservación. También ofrece la posibilidad de realizar

estudios multitemporales, con los que se pueden detectar cambios en el paisaje en un periodo determinado y con ello analizar la dinámica de fenómenos como, en este caso, la erosión.

De acuerdo con la hipótesis general del trabajo, que expresa que la erosión del suelo en la Sierra de la Laguna tiene sus orígenes en el impacto de las actividades productivas, particularmente la ganadería, se espera:

1. que a pesar de ser una región relativamente deshabitada, los procesos de erosión hayan afectado superficies importantes de la Sierra de la Laguna, y
2. que la erosión acelerada se refleje en incrementos de las áreas erosionadas en periodos relativamente cortos, que puedan ser detectados por medio de la PR.

En el presente capítulo se toma ventaja de dos fuentes de información obtenidas por PR: la fotografía aérea y las imágenes satelitales, así como de los sistemas de información geográfica (SIG) con el fin de comprobar que en 18 años la superficie erosionada de tres localidades presenta cambios apreciables por la PR.

### 3.2 OBJETIVOS

- a) Realizar un diagnóstico general de los suelos de la Sierra de la Laguna a partir de indicadores indirectos, como patrones de distribución de la vegetación y geomorfología.
- b) Realizar un inventario del área afectada dentro de ella.
- c) Analizar la evolución del fenómeno utilizando imágenes obtenidas en diferentes fechas.
- d) Analizar las tendencias de los índices de aridez en las localidades más afectadas.

### 3.3 MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.3.1 Diagnóstico general de los suelos de la Sierra de la Laguna

El diagnóstico general de los suelos de la Sierra de la Laguna se hizo por la interpretación de fotografías aéreas pancromáticas de diferentes años, tomadas por la Comisión de Estudios del Territorio Nacional (CETENAL), después Dirección de Estudios del Territorio Nacional (DETENAL) y actualmente Dirección General de Geografía del INEGI: de 1978 en escalas 1:50,000 (CETENAL, Zona 48-A) y 1:80,000 (DETENAL, Zona 48-A) y de 1993 en escala 1:75,000 (SINFA, hoja F12-2-3-5-6). Para la fotointerpretación se utilizó un estereoscopio marca Wild modelo TSP1.

Se delimitaron unidades en las que los patrones de distribución (o ausencia) de vegetación, aunados a otras características como poca pendiente o geoformas de acumulación,

sugerían que se presentaban problemas de erosión. Se hicieron cinco visitas al campo entre octubre de 1996 y agosto de 1997 para verificar que las unidades delimitadas durante la fotointerpretación correspondieran a zonas con evidentes procesos de erosión, tales como suelos decapitados y presencia de cárcavas y no sólo a zonas desprovistas de vegetación o con poca cobertura vegetal. La verificación de los suelos decapitados se hizo por comparación con perfiles de suelo descritos en pozos ubicados en las zonas menos perturbadas. Se reconocieron pocas cárcavas, generalmente incluidas en las zonas con erosión hídrica laminar.

Se localizaron en las fotografías las áreas que mejor representaban el fenómeno y los principales tipos de vegetación, con el fin de ser utilizadas posteriormente al crear los polígonos de entrenamiento y las firmas espectrales de las clases correspondientes.

### 3.3.2 Inventario del área afectada

El inventario de la superficie de la Sierra de la Laguna que en 1996 se encontraba erosionada se hizo utilizando una subescena multibanda proveniente de la Landsat Thematic Mapper P34 / R44, con una resolución de 25 m. La imagen fue tomada el 18 de septiembre de 1996 durante la temporada húmeda. Cabe señalar que el huracán Fausto había impactado la región cuatro días antes de la toma de la imagen. La corrección geométrica de la imagen se realizó con base en la Carta Topográfica 1:50,000 del INEGI y se proyectó utilizando el sistema de referencia Universal Transverso de Mercator 12 Norte (UTM-12R).

El límite de la Sierra se marcó sobre la Carta Topográfica 1:50,000 de INEGI y se digitalizó usando el SIG vectorial MapInfo 5.0.1 (1998). El polígono resultante se rasterizó con el SIG IDRISI 14.0 (Clark Labs 2003), se creó una máscara y se extrajo de la subescena multibanda únicamente la superficie correspondiente a la Sierra de la Laguna. De acuerdo con la delimitación hecha en este trabajo, la Sierra cubriría un total de 305,574 ha. La superficie extraída de la imagen de satélite incluye la casi totalidad de la Sierra, con excepción de 268 ha en el extremo sur.

Uno de los objetivos era estimar la superficie erosionada. Para ello se generó un mapa de Uso del Suelo por medio de una clasificación supervisada. El primer paso fue la creación de las firmas espectrales de las diferentes clases, que en nuestro caso fueron diversos tipos de vegetación (matorral, selva y bosque), las zonas erosionadas y el fondo de los arroyos. Para ello se utilizaron polígonos de entrenamiento, los cuales se delimitaron sobre capas generadas con el índice de Brillo y el NDVI (Bonn y Rochon 1992), sustentando la delimitación con la información

recopilada en el campo. La superficie total de los polígonos fue: matorral = 1.95 km<sup>2</sup>; selva = 2.41 km<sup>2</sup>; bosque = 0.48 km<sup>2</sup>; zonas erosionadas = 0.26 km<sup>2</sup>; fondo de arroyos = 0.24 km<sup>2</sup>. Las firmas espectrales asociadas a cada clase se obtuvieron utilizando las bandas 1, 2, 3, 4, 5 y 7 de Landsat.

Tras haber obtenido las firmas, el máximo reto para poder llevar a cabo una clasificación confiable consistió en poder diferenciar los arroyos de las zonas erosionadas, debido al gran solapamiento de las firmas espectrales que se obtuvo de estas dos clases, caracterizadas por tener los mayores valores de reflectividad.

Con el fin de conseguir la mejor clasificación se aplicó un clasificador basado en el Teorema de Bayes. El enfoque Bayesiano se basa en el conocimiento previo que se tiene sobre un evento dado, ya que es mucho más fácil ajustar una función de probabilidad para ese fenómeno conocido que ajustar otra basada en diversos supuestos; en ésta, el único supuesto es el conocimiento del experto (Freund y Walpole 1987).

### 3.3.3 Análisis de la Evolución del fenómeno (1978 – 1996)

#### a) Selección de áreas representativas de las diferentes condiciones de erosión del suelo.

Una vez realizada la fotointerpretación, se seleccionaron tres áreas de estudio en las que la erosión afectaba superficies importantes. Además de ser las áreas más evidentemente afectadas, la selección se hizo tratando de abarcar diversos factores que pudieran estar ocasionando el deterioro del suelo además de la ganadería, como la apertura de caminos y la sequía diferencial por latitud, vertiente y exposición a la radiación solar. Adicionalmente, se tomaron en cuenta aspectos prácticos como la relativa facilidad de acceso, previendo la realización de las verificaciones en campo. Con el fin de conocer la estructura de la selva y la cobertura por especie se tomó registro de las especies presentes dentro de la vegetación en relativamente buen estado y en sitios erosionados, mediante levantamientos de vegetación.

Las áreas seleccionadas, cuya ubicación se muestra en la Fig. 3.1, se describen a continuación:

#### *Area No. 1 "San Antonio de la Sierra".*

El área "San Antonio de la Sierra" se localiza entre las coordenadas 23° 42' 20" N / 110° 01' 08" W y 23° 36' 52" N / 109° 53' 32" W (600,000 / 2,622,000 y 613,000 / 2,612,000, UTM-12R).

Es el área de mayor dimensión (13,990 ha) con problemas de erosión entre las que se determinaron dentro del macizo montañoso.

En su mayor parte es un lomerío con altitudes que varían entre los 800 y los 900 msnm, aunque en la región oeste alcanza los 1,100 msnm. Geológicamente es un complejo en el que se encuentran afloramientos de rocas intrusivas, extrusivas y metamórficas, debido a que se encuentra en la zona en la que la porción que derivó desde el continente hacia la península hizo contacto con las tierras emergidas del fondo del mar. Se encontraron rocas fracturadas que evidencian cambios importantes de temperatura a lo largo del día.

La vegetación es en su mayor parte selva baja caducifolia, aunque existen varios manchones de bosque, en los que están presentes las especies de encino *Quercus albocincta* Trel., *Q. tuberculata* Liebm. y *Q. devia* Goldman, que en ocasiones se localizan como individuos aislados en las laderas o agrupados dentro de las cañadas. Es común encontrar manchones de bosque en cañadas situadas altitudinalmente por debajo de la selva baja caducifolia. Esta fisonomía tan particular de la vegetación podría deberse al hecho de que ésta área se ubica en una zona de transición entre la selva baja caducifolia y el bosque de encinos, entre las llanuras emergidas de la península y la porción desprendida del continente, y entre el Desierto Sonorense y la Región del Cabo.

Hacia finales del siglo XIX Brandegee llevó a cabo una colecta de especímenes vegetales en esta localidad, de la cual parecen haber desaparecido algunas especies que requieren para su establecimiento condiciones de mayor humedad que las que prevalecen actualmente, entre ellas las leguminosas *Brongniartia trifoliata* Brandegee y *Marina evanescens* (Brandegee) Barneby (León de la Luz, com. pers.). Esto sugeriría que la eliminación de la cobertura vegetal y la consecuente erosión que afectan el área de San Antonio de la Sierra podrían haberse originado por un fenómeno de desertización derivado de cambios climáticos a muy largo plazo. Dentro de esta área se ubican once ranchos ganaderos (Breceda y Ramírez, en prensa).

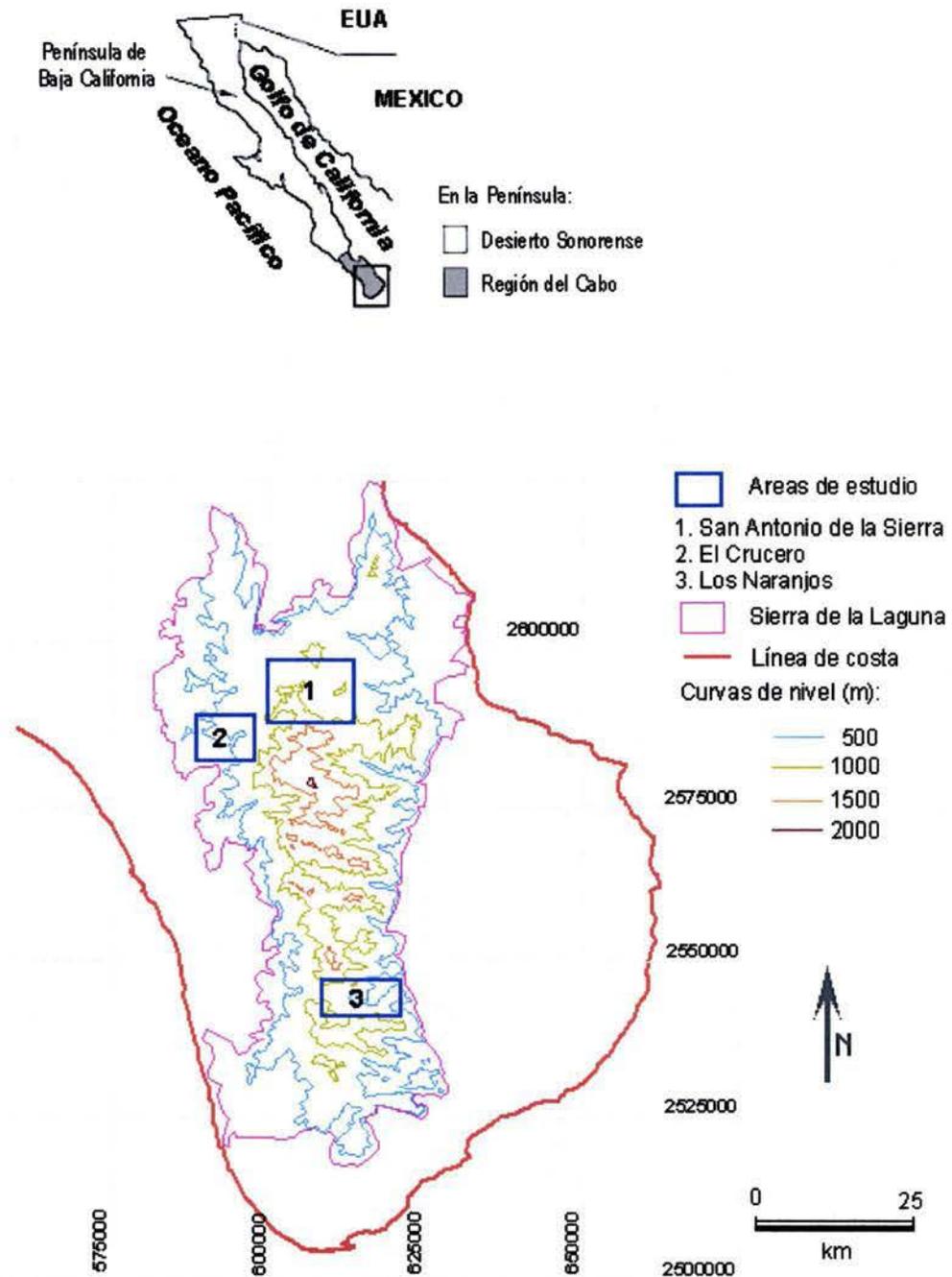


Figura 3.1. Localización de las Areas de Estudio

**Area No. 2: "El Crucero"**

El área de El Crucero se localiza entre las coordenadas  $23^{\circ} 37' 50''$  N /  $110^{\circ} 07' 45''$  W y  $23^{\circ} 33' 44''$  N /  $110^{\circ} 02' 19''$  W (588,800 / 2,613,600 y 598,100 / 2,606,100, UTM-12R). Es un

área de menor dimensión (7,043 ha) y condiciones de mayor humedad que el área de San Antonio de la Sierra.

Ubicada entre los 500 y los 600 msnm, es un lomerío bajo de pendientes suaves en el que se pueden observar aún antiguos caminos de herradura marcados a lo largo de los parteaguas. Algunos de ellos fueron utilizados por vehículos automotores desde los años setenta hasta que se volvieron intransitables debido a la erosión y a la falta de mantenimiento.

Además del ganado bovino, en esta área se crían mulas y caballos que acostumbran alimentarse de la corteza de los árboles, en los que se presenta evidencia de consumo de diferentes periodos. En algunos individuos se pudo observar daño muy intenso.

La erosión que se presenta es severa, básicamente de tipo hídrica laminar, aunque también existe la hídrica en cárcavas. En algunos sitios la capa edáfica ha sido totalmente eliminada, dejando al descubierto el material geológico subyacente.

La geología está compuesta por un complejo metamórfico con abundantes diaclasas en las que se han acumulado y cementado sedimentos. En algunos sitios estas cementaciones han quedado expuestas en forma de gruesas láminas verticales y horizontales debido a la intemperización de los materiales menos resistentes de la roca.

La vegetación es mayormente selva baja caducifolia. La parte alta de algunas lomas aún conserva manchones de vegetación en relativamente buen estado, tomando en cuenta las especies que se encuentran representadas (Anexo 3) y la presencia de mantillo, en tanto que en las laderas es común encontrar sólo algunos individuos agrupados en cúmulos dispersos. En cada cúmulo hay un individuo dominante, que contribuye mayormente a retener el suelo con sus raíces y proporciona sombra a los demás. En esta área se localizan seis ranchos ganaderos (Breceda y Ramírez, en prensa).

En el área de El Crucero, particularmente en la superficie de los cúmulos, son abundantes las cortezas microbióticas, las cuales se tratarán más ampliamente en el Capítulo 5.

### Area No. 3: "Cañada de Los Naranjos".

Esta área cubre una superficie de 7,806 ha y se localiza entre las coordenadas 23° 15' 13" N / 109° 56' 25" W y 23° 11' 55" N / 109° 48' 59" W (608,400 / 2,572,000 y 621,100 / 2,566,000, UTM-12R). La Cañada de Los Naranjos cruza la Sierra de la Laguna en dirección este – oeste; una de sus características es la marcada diferencia que existe entre las laderas norte y sur debido a su exposición a la radiación solar: la ladera con exposición sur presenta vegetación menos densa y condiciones de menor humedad con relación a la ladera expuesta hacia el norte, en la cual se pueden encontrar individuos de *Erythea brandegeei* Purpus ("palma de taco") en la parte media e incluso en las cumbres bajas.

En esta área el impacto de la ganadería no parece ser tan obvio como en la de San Antonio de la Sierra porque casi no existen pasos de ganado. Inicialmente se eligió ésta como un área representativa de poca influencia de ganadería. Sin embargo, durante las verificaciones de campo se pudo constatar que en esta zona el ganado es principalmente caprino. En todos los sitios visitados se encontraron rastros de chivos e incluso se avistaron algunos hatos. Esta es por lo tanto un área utilizada principalmente por ganado caprino, a diferencia de San Antonio de la Sierra y El Crucero, en donde el ganado bovino y caballar son, respectivamente, importantes factores de impacto. Dentro de esta área se encuentran nueve ranchos (INEGI 1998).

### b) Generación de los mapas de erosión de las dos fechas (1978 – 1996)

Se crearon dos versiones de los mapas de erosión de 1978 para cada una de las áreas de estudio. La primera ("por unidades") se hizo con las unidades delimitadas durante la fotointerpretación. Una vez fotointerpretadas, las fotografías se rasterizaron y se corrigieron geométricamente utilizando de 15 a 40 puntos de correspondencia para cada una, dependiendo de la deformación de las fotografías causada por las características montañosas de la región. Las correcciones se realizaron utilizando funciones cuadráticas (de segundo orden), consiguiendo desplazamientos máximos inferiores a 50 m.

Posteriormente, las unidades de erosión se digitalizaron y rasterizaron con los SIG MapInfo (1998) e IDRISI (Clark Lab 2003), generando de esta forma los mapas binarios (booleanos, lógicos) de erosión "por unidades" 1978 para cada una de las áreas.

Una segunda versión del mapa de erosión 1978 ("pixel por pixel") se creó utilizando los diversos tonos de gris de las fotografías aéreas pancromáticas. Para ello se corrigieron

geométricamente las fotografías aéreas limpias en forma semejante a la anteriormente descrita. Con las fotografías corregidas se elaboraron los mosaicos correspondientes a cada una de las áreas de estudio, con el fin de generar una imagen que cubriera cada área en su totalidad, con una resolución de 25 m. Se tomaron como referencia las unidades delimitadas como erosionadas durante la fotointerpretación para crear los polígonos de entrenamiento correspondientes a la erosión. Tomando como base el mapa de Uso del Suelo originado a partir de una clasificación supervisada (apartado 3.3.2 de este mismo capítulo) se crearon los polígonos de entrenamiento para los arroyos, el bosque y la selva.

Se produjeron las firmas espectrales correspondientes a cada clase utilizando el mosaico de las fotografías de 1978 y las bandas 2, 3 y 4 de la subescena Landsat. Posteriormente se realizó una clasificación supervisada por máxima verosimilitud, seguida de un filtraje y una reclasificación, que dieron por resultado los mapas binarios de erosión "pixel por pixel" 1978 para cada una de las áreas.

El mapa binario de erosión de 1996 para cada una de las áreas de estudio se produjo por la reclasificación del mapa de Uso del Suelo obtenido a partir de la imagen Landsat (apartado 3.3.2 de este mismo capítulo).

Los mapas de erosión de 18 años se obtuvieron por una substracción del mapa binario de erosión "pixel por pixel" de 1978 del de 1996 para cada área de estudio.

#### 3.3.4 Tendencias del índice de aridez en las localidades más afectadas

Con el objeto de descartar que se estuviera presentando un fenómeno de desertización en el norte de la Sierra, representada en este estudio por el área de San Antonio de la Sierra, se analizaron las condiciones climáticas de las tres áreas de estudio. Tomando ventaja de que se contaba con registros de entre 40 y 50 años de estaciones relativamente cercanas a cada una de las áreas de estudio (San Antonio de la Sierra - estación "San Bartolo"; El Crucero - estación "Santa Gertrudis"; Cañada de Los Naranjos - estación "San Felipe"), por medio de análisis de regresión se estimaron las tendencias de los índices de aridez de cada una de ellas. El índice de aridez utilizado fue el de Martonne (1926, en Salinas *et al.* 1998), el cual se expresa con la siguiente función:

$$Ar = P / (T + 10) \quad (3.1)$$

En donde Ar = Índice de aridez; P = precipitación total anual en mm; T = temperatura media anual en grados centígrados.

Para los valores que resultan de este índice, Martonne (1926) definió las siguientes categorías: 0 – 5 = desértico; 5 – 10 = árido; 10 – 20 = semiárido; 15 – 25 = transición; 20 – 25 = semihúmedo; 25 – 30 = húmedo; 35 = torrencial. De acuerdo con esta clasificación, valores bajos del índice de aridez indican condiciones de mayor sequía.

El periodo analizado incluyó los datos de 1943 a 1997, de los que se eliminaron de las tres localidades los años en los que los registros, fuera de precipitación o temperatura, estuvieran incompletos.

### 3.4 RESULTADOS

#### 3.4.1 Diagnóstico general de los suelos de la Sierra de la Laguna.

Al hacer la fotointerpretación fue posible determinar que los mayores problemas de erosión dentro del macizo montañoso se presentaban en la selva baja caducifolia, sobre todo en zonas aledañas a caminos que conducen a pequeños poblados o a ranchos de escasos habitantes. Los resultados de la fotointerpretación también sugerían que la erosión había aumentado en el intervalo de quince años (1978 – 1993) entre las fechas en las que fueron tomadas las fotografías. La Figura 3.2 ejemplifica la diferencia en cobertura de vegetación que se pudo apreciar en el área San Antonio de la Sierra.

#### 3.4.2 Inventario del área afectada

El mapa de Uso del Suelo, obtenido con base en la clasificación de Bayes, se presenta en la Fig. 3.3. De acuerdo con este mapa, en 1996 las zonas erosionadas en la Sierra de la Laguna cubrían una superficie de 14,350 ha, representando cerca del 5 % de la superficie total de la Sierra (305,574 ha). Se pudieron distinguir tres áreas fuertemente afectadas por la erosión: San Antonio de la Sierra, El Crucero y la Cañada de los Naranjos.

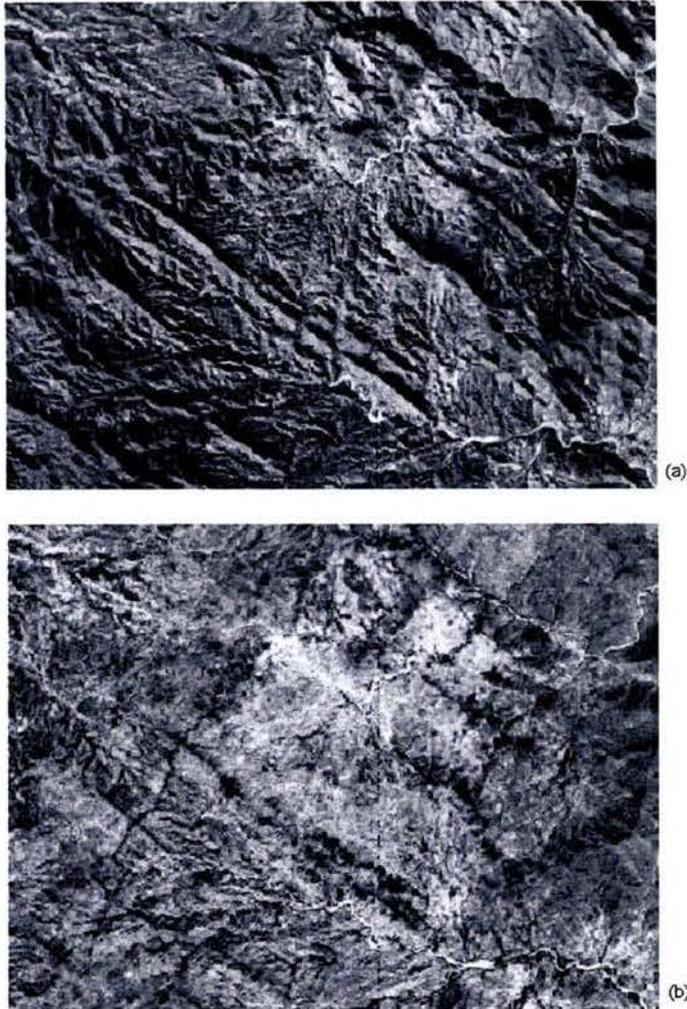


Figura 3.2. Extracto de las fotografías aéreas del área San Antonio de la Sierra que cubren la misma zona: (a) noviembre de 1978; (b) marzo de 1993.

### 3.4.3 Análisis de la Evolución del fenómeno (1978 – 1996)

En las Figuras 3.4 a 3.6 se muestran los mapas de erosión obtenidos por fotointerpretación ("por unidades") y por la clasificación de las fotografías pancromáticas ("pixel por pixel") de 1978. Se puede observar que existen marcadas diferencias entre los resultados obtenidos con cada una de las dos técnicas aplicadas, ya que con la primera se obtienen unidades grandes y aisladas, excluyéndose las pequeñas áreas que por su extensión no serían cartografiables. En la clasificación "pixel por pixel" en cambio, son muy abundantes las unidades pequeñas, que al sumarse abarcan grandes superficies.

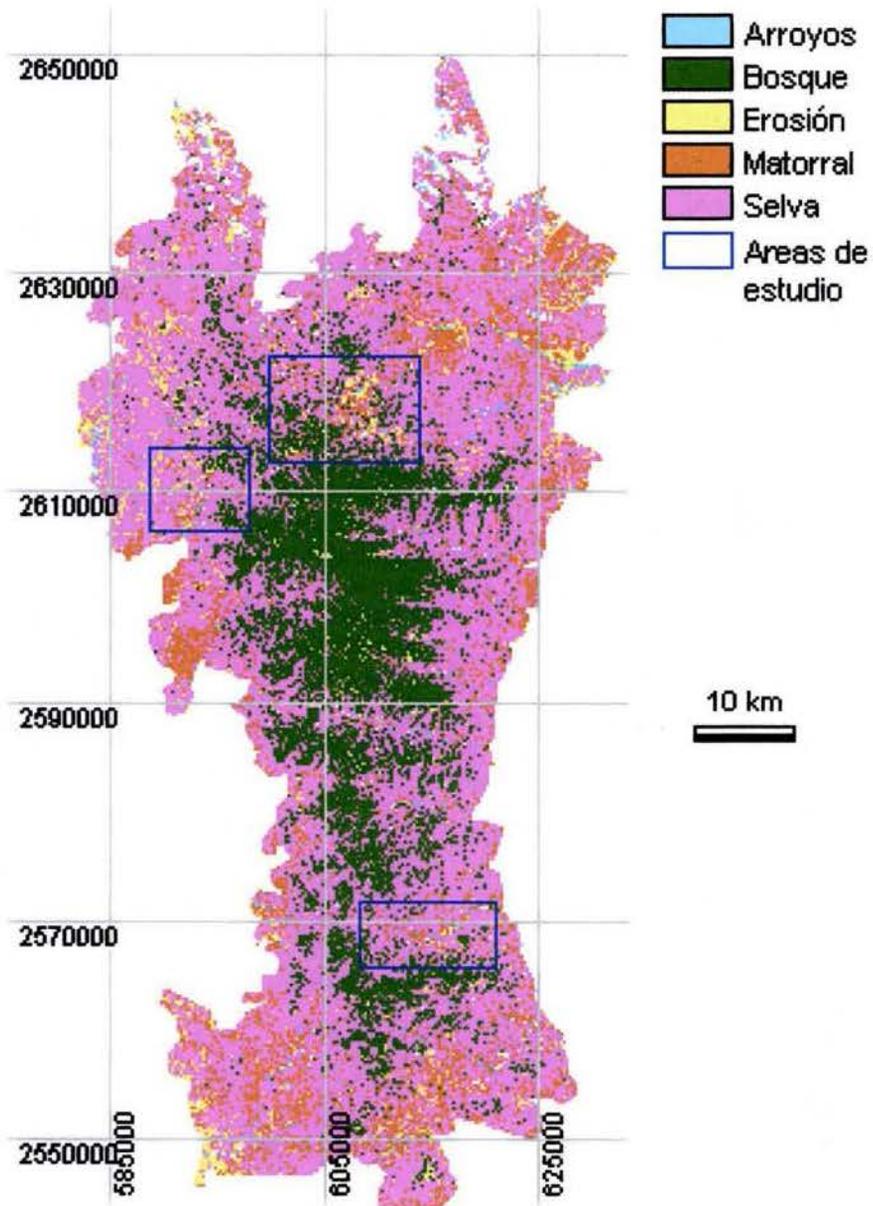


Figura 3.3. Mapa de Uso del Suelo, generado por clasificación supervisada (Bayes) de la subescena multibanda LANDSAT TM del 18 de septiembre de 1996.

La Figura 3.7 presenta los mapas de erosión de 1996 obtenidos a partir de la reclasificación del mapa de Uso del Suelo. Se pueden observar que son múltiples las pequeñas unidades de uno o pocos píxeles que no cumplirían con el tamaño mínimo cartografiable de los mapas analógicos.

En la Figura 3.8 se presentan los mapas del incremento de la superficie erosionada en 18 años. Se puede observar que el área de estudio de San Antonio de la Sierra fue la que sufrió el mayor incremento en la superficie erosionada durante el periodo de 18 años analizado, en contraposición con la Cañada de los Naranjos, en donde la superficie erosionada durante ese periodo es casi inapreciable en el mapa.

Los resultados de la comparación entre las superficies erosionadas de 1978 y 1996 se presentan en el Cuadro 3.1. Se puede observar que la superficie erosionada aumentó desde cerca de 14 % hasta más de 100 % durante el periodo analizado.

Cuadro 3.1. Comparación de las superficies erosionadas. En *itálicas* se presentan las superficies estimadas por fotointerpretación ("por unidades"); en *negrillas* las estimadas utilizando los tonos de grises de las fotografías pancromáticas y las bandas 2, 3 y 4 de Landsat ("pixel por pixel"). La superficie para 1996 se estimó con las bandas 1, 2, 3, 4, 5 y 7 de Landsat.

| LOCALIDAD                | SUPERFICIE EROSIONADA |                  |                 |              |                  |                |                  |
|--------------------------|-----------------------|------------------|-----------------|--------------|------------------|----------------|------------------|
|                          | 1978 (ha)             |                  | 1996 (ha)       | 18 años (ha) |                  | Incremento (%) |                  |
|                          | Fotoint.              | <i>pix-X-pix</i> | clasif. LANDSAT | Fotoint.     | <i>pix-X-pix</i> | Fotoint.       | <i>pix-X-pix</i> |
| San Antonio de la Sierra | <i>570</i>            | <b>348</b>       | 736             | <i>166</i>   | <b>388</b>       | <i>29.10</i>   | <b>111.50</b>    |
| El Crucero               | <i>350</i>            | <b>424</b>       | 603             | <i>253</i>   | <b>179</b>       | <i>72.28</i>   | <b>42.00</b>     |
| Los Naranjos             | <i>62</i>             | <b>211</b>       | 240             | <i>178</i>   | <b>29</b>        | <i>287.0</i>   | <b>13.70</b>     |

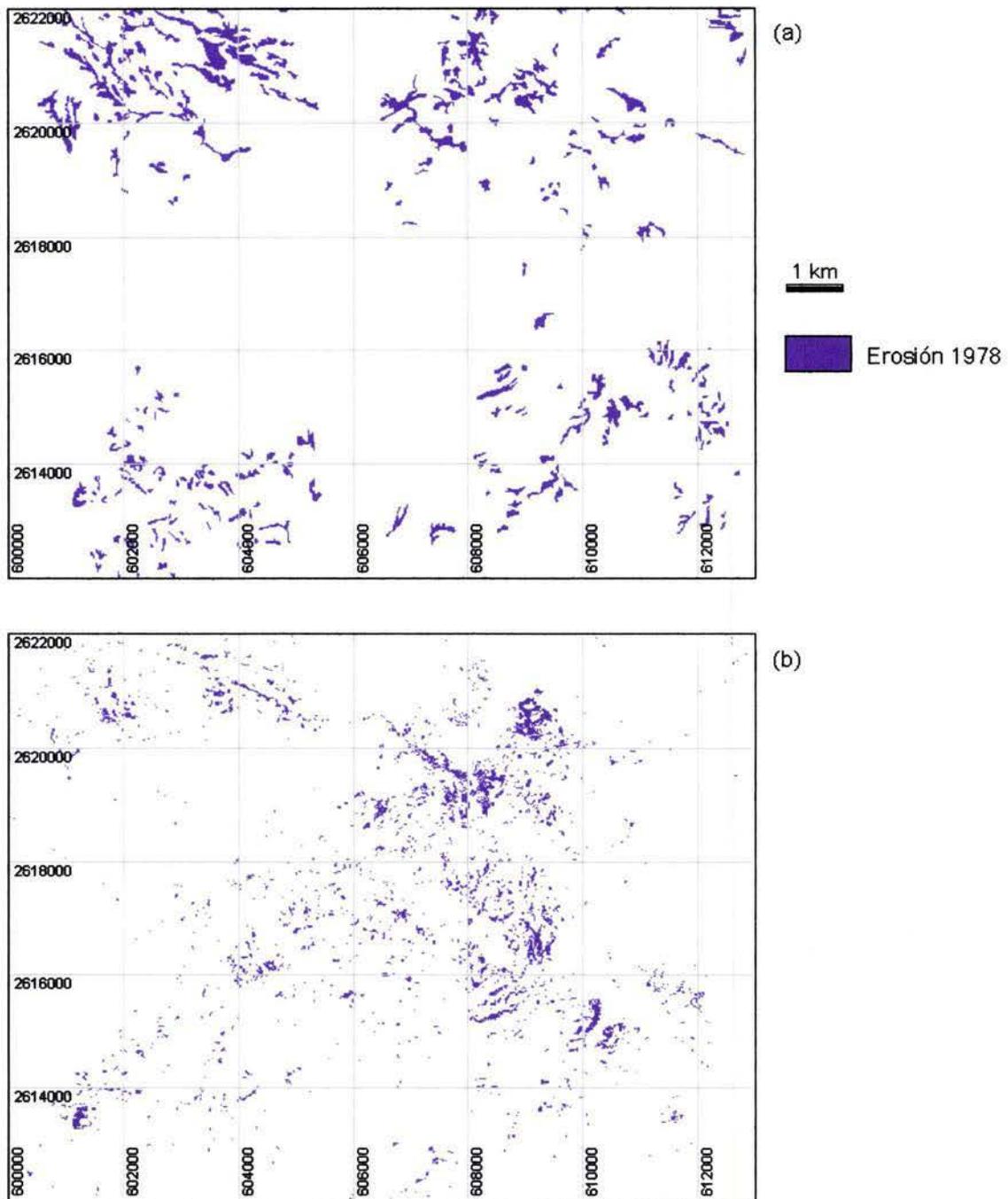


Figura 3.4. Mapas de erosión de 1978 del área San Antonio de la Sierra: (a) obtenidos por fotointerpretación ("por unidades"); (b) obtenidos por clasificación de fotografías aéreas pancromáticas ("pixel por pixel").

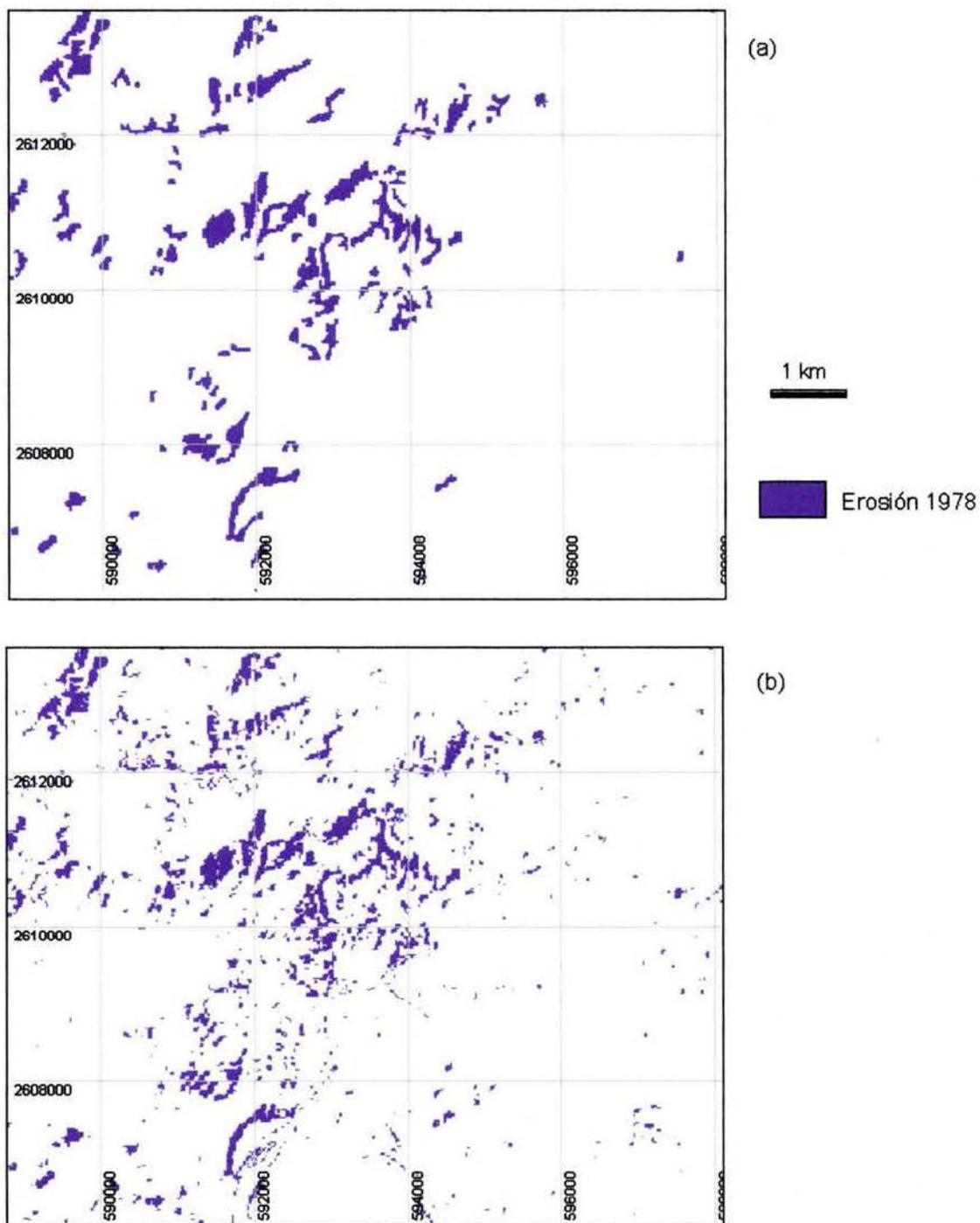


Figura 3.5. Mapas de erosión de 1978 del área El Crucero: (a) obtenidos por fotointerpretación ("por unidades"); (b) obtenidos por clasificación de fotografías aéreas pancromáticas ("pixel por pixel").

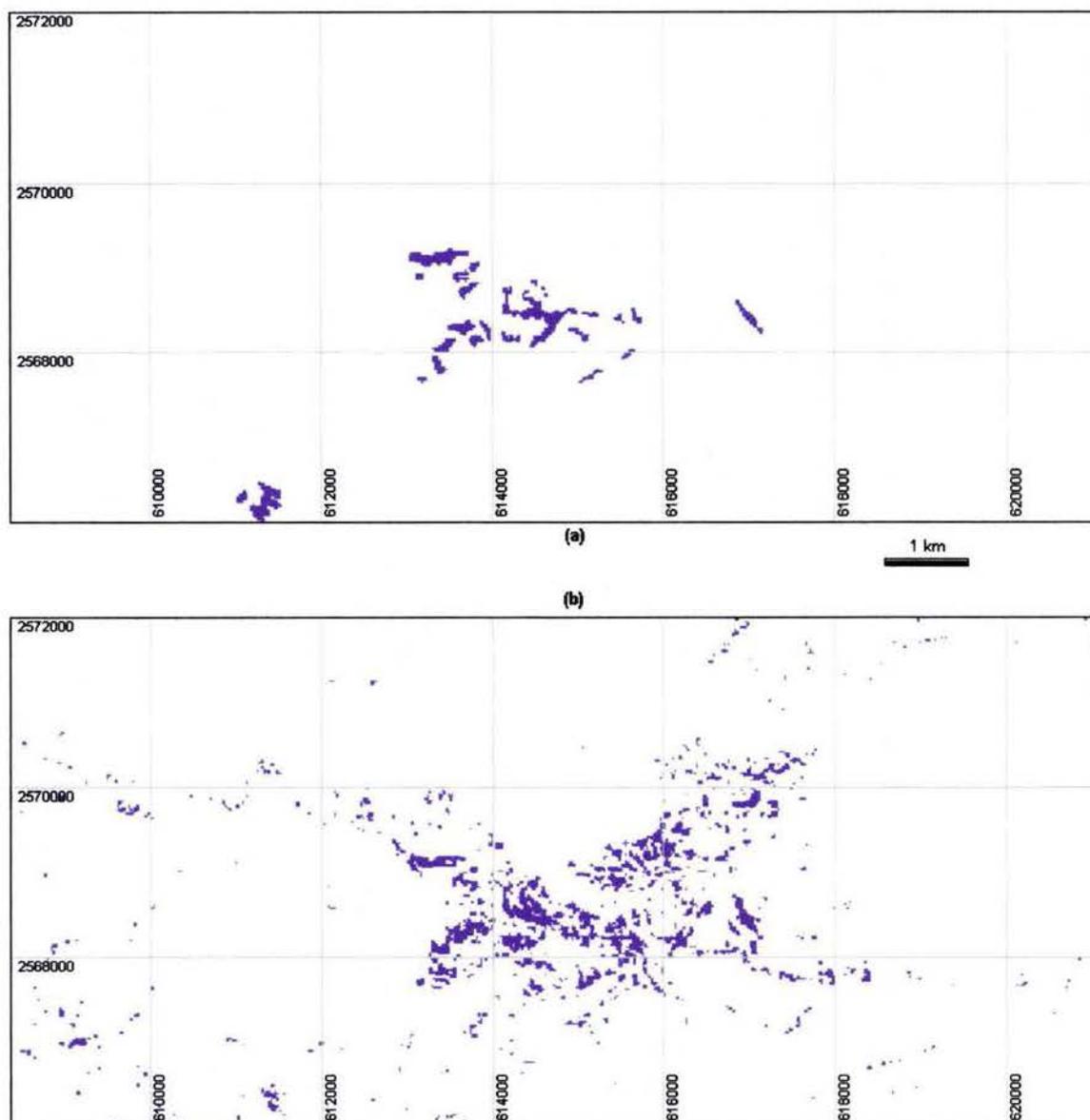


Figura 3.6. Mapas de erosión de 1978 del área Cañada de Los Naranjos. (a) obtenidos por fotointerpretación ("por unidades"); (b) obtenidos por clasificación de fotografías aéreas pancromáticas ("pixel por pixel").

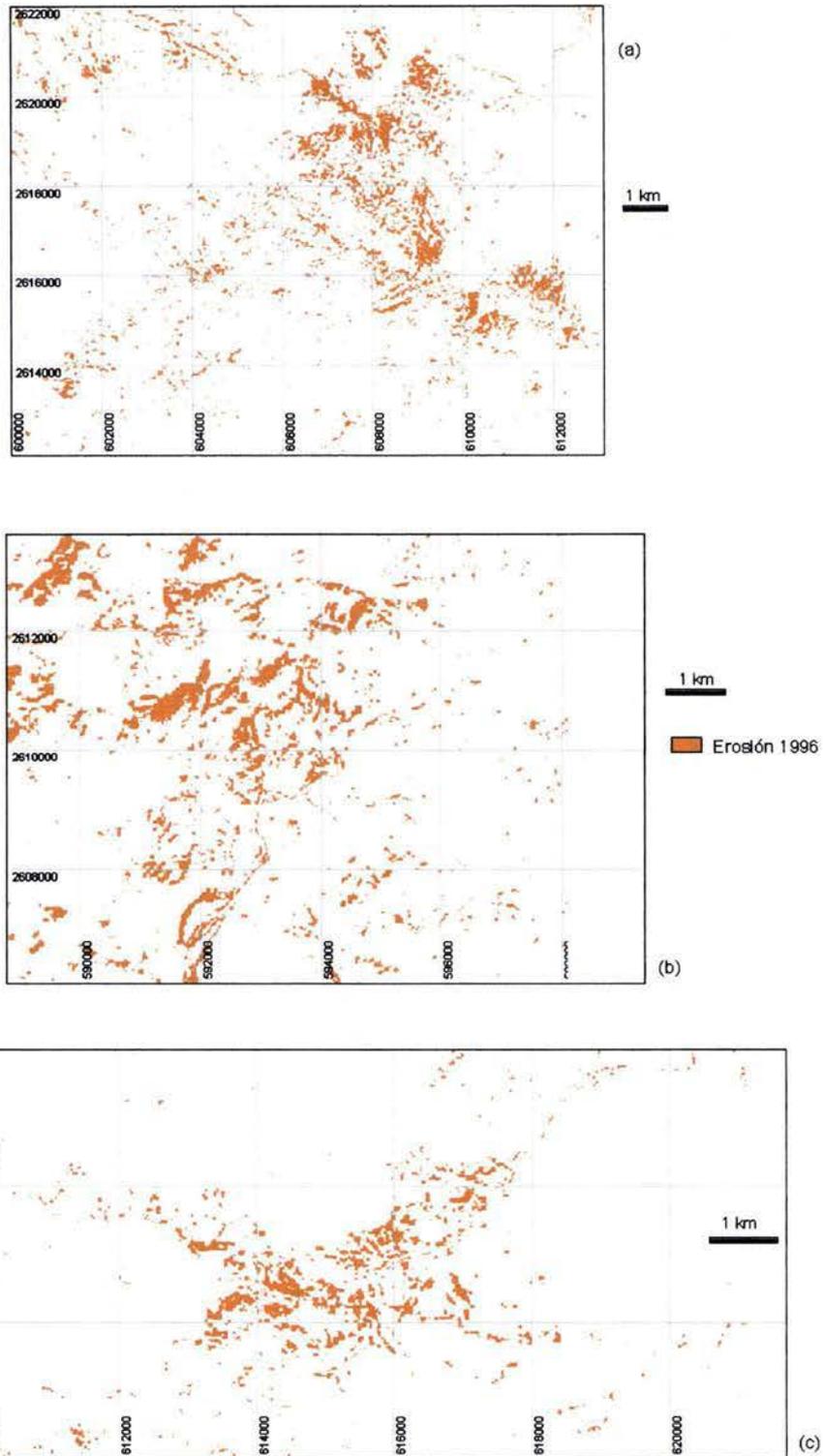


Figura 3.7. Superficie erosionada en 1996 (a) San Antonio de la Sierra; (b) El Crucero; (c) Cañada de los Naranjos

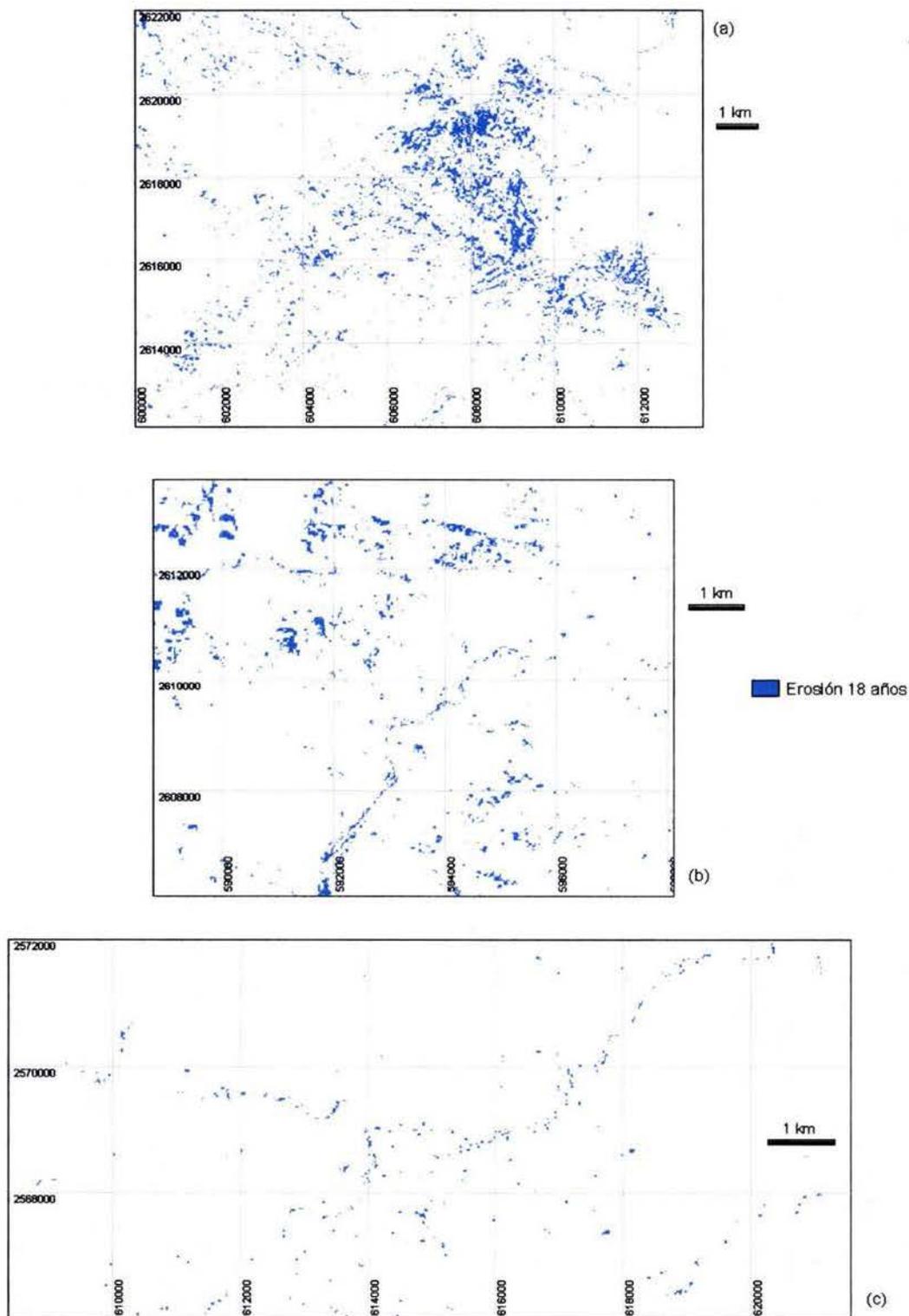


Figura 3.8. Superficie erosionada durante el periodo 1978 – 1996. (a) San Antonio de la Sierra; (b) El Crucero; (c) Cañada de los Naranjos

### 3.4.4 Tendencias de los índices de aridez en las localidades más afectadas.

En el Cuadro 3.2 se presentan los resultados de las tendencias del índice de aridez (IA) de las estaciones representativas de las tres áreas de estudio. La pendiente negativa de la recta obtenida para San Antonio de la Sierra demuestra que efectivamente existen condiciones microclimáticas en esta localidad, la cual presenta una tendencia hacia mayor aridez. La pendiente de las otras dos localidades es positiva, señalando una tendencia hacia menor aridez, además de que los valores sugieren que esta tendencia es semejante en ambas localidades. Los resultados de los promedios del índice de aridez para las tres localidades las ubican a todas en el intervalo de  $IA = 10 - 20$ , es decir, semiárido (Martonne 1926, en Salinas *et al.* 1998). Hay un gradiente de menor a mayor aridez de sur a norte.

Cuadro 3.2. Resultados del análisis de tendencias del Índice de Aridez

| AREA DE ESTUDIO          | Estación y número de años considerado durante el periodo analizado (1943 – 1997) | Pendiente de la recta de regresión | Promedio del IA en el periodo analizado |
|--------------------------|--|------------------------------------|---|
| San Antonio de la Sierra | San Bartolo (49 años)  | - 0.0035                           | 10.4                                    |
| El Crucero               | Santa Gertrudis (50 años)  | 0.0495                             | 13.8                                    |
| Los Naranjos             | San Felipe (40 años)   | 0.0475                             | 14.6                                    |

## 3.5 DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

### 3.5.1 Inventario del área afectada

En el mapa de Uso del Suelo (Fig. 3.3) se puede apreciar que varias unidades dentro de la sierra fueron clasificadas como matorral. Esto resultó interesante al considerar que la mayoría se encuentra dentro de las áreas más fuertemente afectadas por la erosión en la actualidad y que deberían haber sido clasificadas como selva baja caducifolia. En el terreno se pudo comprobar que en estas unidades de “matorral” varios elementos arbóreos de la selva ya no existían, que la vegetación era muy abierta y que eran abundantes los individuos de *Jatropha vernicosa* Brandegees (lomboy rojo) en las tres áreas y *Dodonaea viscosa* Jacq. (guayabillo) en San Antonio

de la Sierra, siendo ambas especies arbustivas indicadoras de perturbación dentro de la selva y el bosque, respectivamente. Por esta razón podría considerarse que, dentro de los límites del macizo montañoso, las unidades que fueron clasificadas como matorral representarían una condición del suelo en riesgo de erosión.

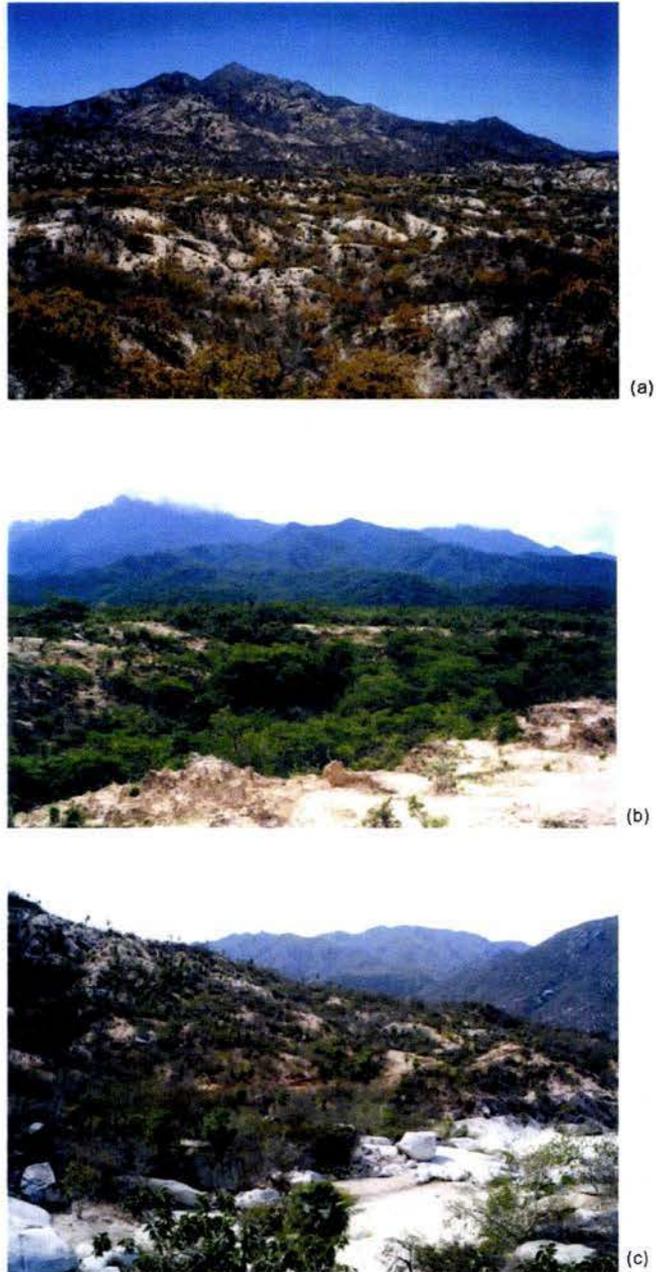


Figura 3.9. Paisajes representando la distribución de la erosión en parches en las tres áreas de estudio (a) San Antonio de la Sierra; (b) El Crucero; (c) Cañada de los Naranjos

### 3.5.2 Análisis de la Evolución del fenómeno (1978 – 1996)

El tipo de erosión dominante en la sierra es la hídrica laminar. En la Figura 3.9 se muestran ejemplos de los paisajes que son comunes en las áreas de estudio, en los que se puede observar que la erosión progresiva ha dejado parches de terreno desnudo entre la vegetación. Uno de los mayores problemas se presentó al tratar de comparar los mapas de erosión obtenidos por fotointerpretación con los generados por la clasificación de las imágenes satelitales. Debido al tamaño mínimo cartografiable ( $0.5 \text{ mm}^2$ ) y a la superficie que cubre la tinta al delimitar las unidades, durante la interpretación de fotografías escala 1:80,000 no fue posible separar cada uno de estos pequeños parches de terreno erosionado. Normalmente, en la fotointerpretación se incluirían varios de estos parches en una sola gran unidad que contendría una asociación de zonas erosionadas y vegetación. Sin embargo, este tipo de unidades no son comparables con las generadas en la clasificación de una imagen satelital, en donde la unidad mínima a clasificar es el pixel, en nuestro caso de 25 m, que en la fotografía aérea equivaldría a 0.33 mm.

Fue por esta razón que se generaron los mapas de erosión de 1978 "pixel por pixel" utilizando las imágenes pancromáticas y las bandas de la imagen de 1996 de Landsat que dieron los mejores resultados para esta clasificación, asumiendo que (1) las zonas erosionadas en 1978 seguirían erosionadas en 1996 y (2) las zonas que no estuvieran erosionadas en 1978 generarían una firma diferente al combinarse con los datos de 1996. Al comparar los mapas generados con las fotografías estereoscópicas, los resultados se consideraron satisfactorios y permitieron hacer una estimación de la erosión para 1978 más aproximada a la realidad en el terreno y, sobre todo, que pudiera ser comparable con la obtenida para 1996.

Estos resultados, que se muestran en negrillas en el Cuadro 3.1, demuestran que hubo un incremento en la superficie erosionada entre 1978 y 1996, de diferentes proporciones en cada una de las áreas de estudio. El área más afectada fue San Antonio de la Sierra con un incremento de 111.5 %, seguida por El Crucero con 42 % y finalmente Los Naranjos con 13.7 %. Una de las causas de la gran diferencia entre las tres áreas podría explicarse por la predominancia del ganado bovino en San Antonio de la Sierra y la gran presión de pastoreo que hubo en esta área en el pasado. Es conocido el efecto que el pastoreo por herbívoros mayores causa en el suelo por apisonamiento, rompiendo los agregados, compactándolo, abatiendo su capacidad de infiltración y aumentando el escurrimiento superficial, el área descubierta, y que el avance de estos procesos facilita la erosión, tanto eólica como hídrica (Westoby 1980, Saunders y Young 1983, Armstrong y

Mitchell 1987, Trimble 1990, Yagama *et al.* 1990). Además eliminan el mantillo y destruyen las plántulas, impidiendo que la vegetación logre regenerarse (Riney 1982).

### 3.5.3 Tendencias de los índices de aridez en las localidades más afectadas.

Como se señaló anteriormente, algunos datos históricos de colectas botánicas sugerían que en la localidad de San Antonio de la Sierra se podría estar presentando algún proceso de desertización que explicaría el mayor incremento en la erosión en el periodo analizado con respecto a las otras dos localidades.

Salinas *et al.* (1998), con base en los datos climatológicos de 40 años de 181 estaciones distribuidas en los cuatro estados que bordean el Golfo de California, hicieron un análisis sobre la variabilidad espacial y temporal de la aridez en esta gran región. Concluyeron que la cobertura árida del noroeste mexicano mostró una disminución de cerca del 37 % durante el periodo analizado, siendo la Sierra de la Laguna una de las áreas más estables. En un estudio a menor escala, Salinas *et al.* (1990) analizaron los patrones anuales de precipitación en 57 estaciones de Baja California Sur con entre 20 y 40 años de operación, con el fin de obtener la variabilidad climática de los regímenes pluviométricos del estado. De acuerdo con los resultados obtenidos a partir de la combinación de un análisis armónico combinado con la técnica de los promedios móviles, la Sierra de la Laguna mostró una gran estabilidad climática, que coincide con el predominio de señales del intervalo "cuasibianual", además de recibir con mayor eficiencia la influencia de la actividad ciclónica del Pacífico tropical y particularmente de los ciclones que penetran a la zona.

A un nivel aún más local para la Sierra de la Laguna, Díaz *et al.* (1994) hicieron un estudio sobre la aridez en el macizo montañoso. Analizaron los registros de temperatura y precipitación dentro de un periodo de 49 años de nueve estaciones climatológicas distribuidas a lo largo de la sierra, concluyendo que la tendencia general era hacia menor aridez.

Toda esta valiosa información, que señala a la Sierra de la Laguna como climáticamente muy estable y con una tendencia general hacia la disminución de la aridez, era sin embargo demasiado generalizada para poder determinar la existencia de alguna diferencia microclimática entre las tres áreas de estudio que permitiera rechazar la hipótesis sobre algún proceso de desertización a largo plazo. En el presente trabajo se analizaron las tendencias de los índices de aridez, obtenidos a partir de los datos de precipitación total anual y de temperaturas medias

anuales de las tres estaciones que por su ubicación representarían a las tres localidades más afectadas por la erosión. Los resultados demostraron que, efectivamente, existe una tendencia hacia mayor aridez del área de San Antonio de la Sierra, por lo que la hipótesis de que se está presentando un fenómeno de desertización en esta localidad no pudo ser rechazada.

Como se mencionó anteriormente, el área de San Antonio de la Sierra se ubica en una zona de transición entre el árido Desierto Sonorense y la más tropical Región del Cabo. Los resultados obtenidos sugieren que en esta localidad se está presentando un avance de las condiciones más áridas colindantes hacia el interior del macizo montañoso, con el posible reemplazo de algunas especies vegetales por otras. Este es uno de los cambios que se asocian con la desertización (Glantz y Orlovsky 1983) y que explicaría la ausencia en la actualidad de las especies colectadas por Brandegee hace más de un siglo.

Con base en lo expresado se puede concluir que:

- Con la información recopilada en el campo y la aplicación de herramientas como la PR y los SIG se pudo constatar que la dinámica de la erosión en las áreas afectadas de la Sierra de la Laguna ha alcanzado tal magnitud que las diferencias en superficie son apreciables en intervalos de tiempo relativamente cortos.
- Los factores climáticos parecen contribuir en los procesos erosivos en el área de San Antonio de la Sierra. La presión de la ganadería por bovinos del pasado, combinada con un proceso de desertización a largo plazo explicarían que esta área, entre las tres analizadas, haya mostrado incrementos notables en la superficie erosionada durante el periodo de 18 años analizado.
- Los resultados parecen indicar que la erosión en la Sierra de la Laguna se debe en gran parte al impacto de las actividades productivas, particularmente la ganadería extensiva, e incluso que el ganado bovino tiene mayor impacto en el suelo que el caballar y el caprino. En el siguiente capítulo se ahondará en este aspecto.

## 4. IMPACTO ANTROPOGENICO vs. FACTORES NATURALES

### 4.1 INTRODUCCION

En la Sierra de la Laguna la ganadería extensiva es la actividad económica más importante y de mayor tradición, que se practica principalmente dentro de la selva baja caducifolia. Se inició desde hace alrededor de 400 años, casi desde el primer desembarco de ganado bovino en la región en 1596 (Martínez-Balboa 1981). En la actualidad, la selva baja caducifolia está sometida a un marcado sobrepastoreo (Arriaga y Cancino 1992).

Además del impacto causado directamente por el hombre por la apertura de caminos y la construcción de cercos, sombras y corrales, o por el consumo selectivo de especies vegetales por el ganado, en regiones sometidas a pastoreo por ganado bovino el deterioro del suelo se puede observar en las numerosas sendas por las que se desplaza, que aumentan el área descubierta y facilitan la erosión. La eliminación de la cubierta vegetal no se produce únicamente por pastoreo, sino por los procesos mecánicos de apisonamiento del suelo o por el uso de áreas de descanso o echaderos (Riney 1982). Las propiedades químicas del suelo y los ciclos biogeoquímicos también resultan afectados por el aporte extraordinario de compuestos nitrogenados provenientes de la orina y el excremento del ganado. En este sentido, ya se han desarrollado estudios sobre la influencia de la ganadería en la heterogeneidad espacial de la vegetación y en el deterioro del suelo en condiciones áridas y semiáridas (Ayuba 2001, Adler y Lauenroth 2000). Sin embargo, éstos se han realizado en gran parte en praderas con poca pendiente y pastizales naturales, por lo que la compleja topografía y el tipo de vegetación de la Sierra de la Laguna representan condiciones interesantes para este tipo de estudios.

Información documental sobre las actividades ganaderas, que se conserva en el Archivo Histórico del Estado de Baja California Sur "Pablo L. Martínez" y que fue revisada personalmente, sólo permite conocer que en las primeras décadas del siglo XX hubo un comercio intenso de pieles y animales, pero no se cuenta con registros exactos del número de cabezas que tenían los ranchos. Sin embargo, aún es posible recuperar la historia relatada por los pobladores que vivieron en la época. De acuerdo con lo expresado por el Sr. Juan Núñez del Rancho San Antonio (que se ubica dentro del área de estudio San Antonio de la Sierra), que en 1997 contaba con 86 años de edad, las actividades económicas que podrían estar relacionadas con la degradación de los suelos en esta área son las siguientes:

- Ganadería. Hacia finales del siglo XIX el área se encontraba sometida a pastoreo muy intenso por las más de mil cabezas de bovinos que tenía el rancho del Sr. Santo Ruiz, del que ahora sólo quedan ruinas. Desde 1950 se introdujo ganado caprino, del que se cuentan alrededor de 200 cabezas en la actualidad. Existe la crianza de cerdos y cerdos ferales, que en conjunto se encargan de extraer las raíces tuberosas de varias especies vegetales como la jicama (*Exogonium bracteatum* (Cav.) Choisy) y el caribe (*Cnidocolus angustidens* Torr.).
- Extracción selectiva de especies vegetales. Alrededor de 1930 se hacía la extracción intensa del cascalote de mauto (*Lysiloma divaricata* Hook & Jackson), de la cual no existen registros porque los propietarios del terreno no acudían a las autoridades para declarar la corta selectiva. Aún se pueden ver las ruinas de las piletas en las que se hacía el curtido de las pieles con cascalote.
- Apertura de caminos. El camino de terracería que llega hasta San Antonio de la Sierra se construyó en 1969 sobre un antiguo camino de herradura. A partir de entonces existe la circulación constante de vehículos automotores.

Además de la ganadería extensiva, la minería es otra actividad económica que tuvo gran auge en el pasado en el distrito minero San Antonio - El triunfo (en las cercanías del área San Antonio de la Sierra), de donde se extrajo oro y plata en minas subterráneas desde el siglo XIX hasta 1940 (Martínez 1997). Aunque no está documentado cuánto, esta actividad requería de grandes cantidades de leña para el beneficio de los minerales, la cual seguramente se extraía de los alrededores. También se utilizaron grandes extensiones dentro de la selva baja caducifolia para el depósito del material residual, dejando miles de toneladas de éste directamente sobre la superficie del suelo (Naranjo-Pulido *et al.* 2002).

En cuanto a los factores naturales, los suelos de los ambientes áridos y semiáridos se caracterizan por ser pobres en compuestos orgánicos, debido en gran parte a que el aporte de materia orgánica por parte de la vegetación ocurre en un periodo muy corto del año por las características caducifolias que se presentan como una adaptación a las condiciones extremas de evapotranspiración. Además, la actividad microbiológica que es necesaria para iniciar la mineralización de las macromoléculas que constituyen los restos vegetales se limita a la época húmeda, ocasionando un frágil equilibrio que sólo se mantiene cuando la cubierta vegetal se conserva. Cuando ésta es eliminada no sólo se pierde el aporte periódico de hojarasca, sino que el

exceso de radiación que es común en las zonas áridas acelera la mineralización de los compuestos húmicos estables. Esto incide en algunas de las propiedades físicas del suelo, como la estructura de los agregados, aumentando la erosionabilidad y reduciendo la capacidad de infiltración (Tisdall y Oades 1982, Oades 1984).

Entre los factores climáticos, es reconocida la capacidad erosiva que tienen las lluvias estivales en zonas de influencia de huracanes, cuando grandes volúmenes de agua son liberados en cortos periodos de tiempo (Reyes y Mejía-Trejo 1991). Al carecer de una cubierta vegetal que amortigüe el efecto de estas lluvias, el suelo recibe directamente el impacto de cada gota, desprendiendo y movilizandando las partículas. Otra condición que acentúa el riesgo de erosión en la Sierra de la Laguna son las pendientes fuertes y de gran longitud, ya que aumentan la energía cinética del agua y de las mismas partículas desprendidas, que les confiere un carácter abrasivo que magnifica el efecto (Schwab *et al.* 1990).

Wischmeier y Smith (1978) analizaron los factores que intervienen en la erosión hídrica y propusieron la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE - Universal Soil Loss Equation) para predecir las tasas de erosión en terrenos agrícolas. Ésta y sus modificaciones (RUSLE - Revised Universal Soil Loss Equation, MUSLE - Modified Universal Soil Loss Equation), que hacen posible su utilización en diversos escenarios, se basan en una serie de factores (inclinación y longitud de la pendiente, erosividad de la lluvia, erosionabilidad del suelo, manejo y prácticas de conservación) que se combinan, cada uno cuantificando uno o más procesos y sus interacciones, para estimar una tasa potencial de erosión.

De acuerdo con la hipótesis general del trabajo, que expresa que la erosión del suelo en la Sierra de la Laguna tiene sus orígenes en el impacto de las actividades productivas, particularmente la ganadería, se espera:

1. que exista un efecto directo del pastoreo de bovinos sobre características físicas y químicas del suelo tales como el pH, la conductividad eléctrica, el contenido de materia orgánica, el contenido de diversos iones y la textura,
2. que los mayores problemas de erosión se localicen en áreas impactadas por el hombre, particularmente alrededor de asentamientos humanos y caminos, y
3. que las superficies erosionadas no correspondan con las que se esperaría fueran las más sensibles por las condiciones naturales del suelo, el clima, la cubierta vegetal y la inclinación y longitud de las pendientes.

## 4.2 OBJETIVOS

Los objetivos de este capítulo son:

- a) Determinar si existe una relación entre las características físicas y químicas de los suelos y los procesos relacionados con la erosión del suelo en terrenos sometidos al pastoreo.
- b) Analizar la ubicación de las áreas afectadas con relación a los ranchos ganaderos y las vías de acceso en las áreas de estudio previamente determinadas (San Antonio de la Sierra, El Crucero y Cañada de Los Naranjos).
- c) Estimar las tasas de erosión actual y potencial en las mismas áreas de estudio y determinar si existe correlación entre la ubicación de las zonas afectadas actualmente por la erosión y las zonas más sensibles, de acuerdo con la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE).

## 4.3 MATERIALES Y MÉTODOS

### 4.3.1 Análisis del impacto de la ganadería en las propiedades físicas y químicas del suelo

Se hizo un experimento para determinar si las características físicas y químicas de los suelos y los procesos relacionados con la erosión en terrenos sometidos al pastoreo están asociados. Cabe señalar que, debido a la gran extensión que cubre la selva baja caducifolia en la Sierra de la Laguna y a la variedad de condiciones que por latitud y exposición se presentan en el macizo montañoso, los resultados obtenidos en este experimento sólo reflejan lo que está sucediendo a nivel local.

El sitio de estudio se encuentra dentro de la selva baja caducifolia, a 450 m de altitud en la vertiente oriental de la Sierra de la Laguna, con coordenadas 23° 29' 54" N / 109° 49' 38" W (619,721 / 2,599,195 UTM-12R). La estación meteorológica más cercana al sitio es la de Santiago, que se ubica entre los 300 y 400 msnm. Esta estación reporta una temperatura media anual de 23.5 °C, siendo enero el mes más frío (16.9 °C de temperatura media) y julio el más caluroso (29.8 °C). La precipitación total anual es de 303.1 mm con 8 meses de sequía, presentándose el mayor volumen de precipitación en verano.

Se muestrearon dos parcelas contiguas de igual dimensión (0.5 ha), una sometida permanentemente al pastoreo extensivo y la otra excluida desde 1989 por una cerca que impide el paso del ganado. Ambas parcelas se encontraban establecidas en condiciones similares de

temperatura, exposición, pendiente, tipo de suelo y rocosidad. Al momento del cercado, la distribución de heces y orina en ambas parcelas era prácticamente homogénea en todo el terreno, condición que se mantuvo en la parcela sometida al pastoreo.

Cada parcela se dividió en 10 cuadrantes de 20 x 25 m. En octubre de 1997 se hizo el muestreo de suelo en puntos elegidos al azar, uno por cada cuadrante. Se tomaron dos muestras en cada punto: de 0 a 5 cm y de 5 a 15 cm de profundidad. Las muestras de suelo se tomaron en bolsas de plástico a las que se sacó todo el aire, se etiquetaron y se transportaron al laboratorio, en donde se secaron al aire y se analizaron los siguientes parámetros: textura (tamiz y pipeta, Folk 1969), pH y conductividad eléctrica (potenciómetro y puente de conductividad respectivamente, Jackson 1982) y contenidos de materia orgánica (Walkley – Black 1934), Ca, Mg, Na, K, Fe (espectrofotometría de absorción atómica), carbonatos y bicarbonatos (Reitemeier 1946), nitritos y nitratos (Strickland 1972) y nitrógeno total y asimilable (calculados con base en Hernández-Dávila *et al.* 1991). Los resultados de estos análisis se presentan en el Anexo 1. El análisis de los parámetros físicos y químicos de las muestras de suelo se hizo aplicando pruebas de *t* (Miller 1986) para cada profundidad.

#### 4.3.2 Relación de áreas afectadas y ubicación de los ranchos y caminos de acceso

Se digitalizaron y rasterizaron los caminos de acceso y los ranchos de las tres áreas de estudio descritas en la sección 3.3.3(a). Se calcularon las distancias euclidianas a estos rasgos. Para cada área de estudio se estimó la superficie erosionada en 1996 contenida en una vecindad de 2 km a los caminos y a los ranchos multiplicando los mapas binarios correspondientes. Se eligió un buffer de 2 km considerando que cualquiera de los tres tipos de ganado presentes en la región recorren fácilmente esa distancia.

En virtud de que las áreas de estudio no cubrían la misma superficie, se calculó el porcentaje que representaba la superficie erosionada en cada una de ellas, con el fin de normalizar los datos. Se calculó la longitud total y el número de tramos que formaba la red de caminos que atravesaban cada área, para poder establecer si existía una asociación entre la complejidad de la red de caminos y la superficie erosionada.

4.3.3 Tasas de erosión con base en el USLE (Universal Soil Loss Equation); análisis espacial de la erosión potencial y su correspondencia con las zonas erosionadas en 1996.

Tras décadas de investigación y a partir de cientos de registros obtenidos en parcelas agrícolas experimentales, Wischmeier y Smith (1978) acuñaron el modelo de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE), cuya función es la siguiente:

$$A = LS * R * K * C * P \quad (4.1)$$

En donde A, es el promedio anual de pérdida de suelo ( $t \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ), causada por erosión hídrica laminar y en surcos; LS, es la combinación de la inclinación y la longitud de la pendiente (sin unidades); R, es el factor de erosividad de la lluvia ( $\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ), que cuantifica la energía e intensidad de las tormentas; K, es el factor de erosionabilidad del suelo ( $t \text{ ha h ha}^{-1} \text{ MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ ), que es una medida de la susceptibilidad del suelo a la erosión en condiciones estándar y se ajusta a variaciones de contenido de humedad; C, es el factor de manejo y cobertura vegetal, que estima la tasa de pérdida de suelo en intervalos estacionales a lo largo del año, tomando en cuenta los efectos de uso del suelo, la cobertura aérea (forestal o cultivada), la rugosidad de la superficie y la humedad del suelo; finalmente P, es el factor por prácticas de conservación (surcado al contorno, terrazas, etc.).

La erosión potencial de las tres áreas de estudio, expresadas en  $t \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  se determinó usando el modelo USLE en un sistema de información geográfica. La forma en la que se generó cada una de las capas digitales se describe a continuación:

*a) Factor longitud e inclinación de la pendiente (LS)*

Este factor se obtuvo a partir de la información contenida en el Modelo Digital de Elevación (MDE), con base en Desmet y Govers (1996). El MDE de la Sierra de la Laguna se generó por la digitalización de las curvas de nivel cada 20 m de las cartas topográficas de INEGI escala 1:50,000 correspondientes. Posteriormente se rasterizó, se proyectó al sistema de referencia Universal Transverso de Mercator (UTM-12R) y se extrajeron las ventanas correspondientes a cada área de estudio.

La longitud de la pendiente es el subcomponente L del factor LS; se define como la distancia horizontal del origen del escurrimiento al punto en el que la inclinación de la pendiente disminuye a tal punto que se inicia la depositación de sedimentos o el escurrimiento se concentra en un canal definido (Foster y Wischmeier 1974). Sin embargo, los patrones de divergencia y convergencia

presentes en el terreno montañoso de las áreas de estudio son muy complejos. La generación del factor LS se hizo utilizando el programa USLE2D (Desmet y Govers 1996, van Oost *et al.* en prensa), que ofrece una serie de opciones para seleccionar un algoritmo para el cálculo del factor LS. Con base en Millward y Mersey (1999), se seleccionó el de Nearing (1977), que es una función simple y continua, la cual se complementó con la opción de disgregación de flujos.

*b) Factor erosividad de la lluvia (R)*

En el modelo USLE, la erosividad de la lluvia se estima utilizando el índice de erosividad  $EI_{30}$ , que es el producto de la energía cinética total de la lluvia ( $MJ\ ha^{-1}$ ) y la intensidad máxima de la lluvia en 30 minutos. Para la estimación de este factor se utilizó el método de Figueroa *et al.* (1991), el cual permite predecir la erosividad con base en valores de registro de precipitación. De acuerdo con estos autores, la Península de Baja California se ubica en la región de erosividad II, a la que corresponde la siguiente función para la estimación de la erosividad:

$$R = 3.4555 Pa + 0.006470 Pa^2 \quad (4.2)$$

En donde R, es el factor de erosividad de la lluvia o índice de erosividad anual y Pa, es la precipitación total anual en mm. También se especifica en este método que para la región de erosividad II el 92 % de la variación se debe a la variación en la precipitación estacional.

La relativa cercanía de estaciones meteorológicas con registros históricos a las áreas de estudio (San Antonio de la Sierra - estación San Bartolo; El Crucero - estación Santa Gertrudis; Cañada de Los Naranjos - estación San Felipe), permitió estimar la precipitación total anual promedio de la estación más cercana a cada área durante un periodo de por lo menos 40 años, la cual se aplicó a la función (4.2). Para cada una de las áreas de estudio se pudieron distinguir claramente las estaciones húmeda y seca con base en los promedios de precipitación total mensual del mismo periodo: para San Antonio de la Sierra y El Crucero la estación seca se consideró del 15 de febrero al 15 de julio, en tanto que para la Cañada de los Naranjos del 15 de marzo al 15 de junio. Para cada área se calcularon los porcentajes de la precipitación total anual correspondientes a cada estación. En la estación húmeda San Antonio de la Sierra recibe el 85.39% de la precipitación total anual, El Crucero el 97.62% y la Cañada de los Naranjos el 98.77%. Con estos porcentajes se calculó el índice de erosividad para cada estación (Millward y Mersey 1999).

En ausencia de datos fidedignos que permitieran hacer extrapolaciones a partir de otras estaciones meteorológicas cercanas, para cada área de estudio se generó una capa

correspondiente al factor erosividad para cada estación (húmeda y seca) en la que todos los píxeles tenían el mismo valor estimado.

#### c) Factor erosionabilidad (K)

La erosionabilidad del suelo indica la susceptibilidad de un suelo en particular a ser erosionado (Cook 1936). Está influenciada por propiedades del suelo tales como distribución del tamaño de las partículas, contenido de materia orgánica, tipo y desarrollo de los agregados entre otros (Wischmeier *et al.* 1971). Se puede calcular por mediciones de pérdida de suelo en condiciones estándar de pendiente (9 %), longitud de la pendiente (22.13 m), en cultivo continuo en terrenos que hayan sido cultivados y mantenidos libres de vegetación por más de dos años. Dado lo complejo de la estimación por este método, Wischmeier *et al.* (1971) elaboraron un nomograma que permite estimar el factor K utilizando 5 parámetros del suelo: porcentaje de limos y arenas muy finas (15 a 20 cm superficiales), porcentaje de arena (id.), porcentaje de materia orgánica, tipo de agregados y permeabilidad.

Por fotointerpretación se hizo un mapa de suelos a partir del cual se generó la capa digital correspondiente al factor K. Para ello, a cada unidad de suelo delimitada se asignó un valor de K, el cual se estimó con el nomograma de Wischmeier *et al.* (1971). Los datos requeridos por el nomograma se obtuvieron a partir de la descripción de perfiles de suelo y de los análisis físicos y químicos de las muestras recolectadas (Anexo 2). Los perfiles eran representativos para los diferentes tipos de vegetación que se consideraron se encontraban en condiciones de menor perturbación, de acuerdo con los datos obtenidos por levantamientos de vegetación en las tres áreas de estudio (Anexo 3).

#### d) Factor de manejo y cobertura (C)

Este es uno de los factores más complejos que contiene el modelo USLE, que se estima con base en el tipo de cultivo, el tipo de preparación del terreno y las técnicas de cultivo y cosecha. Sin embargo, Figueroa *et al.* (1991) presentaron una forma de estimar este factor en ecosistemas forestales no perturbados a partir del porcentaje de cobertura por follaje o mantillo. A lo largo de dos años se hicieron estimaciones de cobertura en los diferentes tipos de vegetación menos perturbados, registrando el porcentaje de follaje que retenían las especies dominantes en la comunidad (Anexo 4). Se distinguieron claramente diferencias entre la estación húmeda y la estación seca, debido al carácter caducifolio de la vegetación. También se registró que algunas especies como la cacachila (*Karwinskia humboldtiana* (Willd. ex Roem. & Schult.) Zucc.) conservan

el follaje durante todo el año y otras, como los encinos (*Quercus* spp.) producen una capa de mantillo resistente que cubre el suelo durante todo el tiempo que los árboles no tienen follaje.

A partir del mapa de Uso del Suelo se generó la capa digital del factor C para cada una de las áreas, para las estaciones húmeda y seca. Se asignó el mismo valor a las clases selva, matorral y erosión, considerando que, como se indicó en el Capítulo 3, en condiciones naturales las unidades clasificadas como matorral y erosión corresponderían a la selva.

#### e) Factor por prácticas de conservación (P)

Debido a que no se practica ningún tipo de conservación con el fin de mitigar la erosión en las áreas de estudio, se asignó un valor de 1.0 al factor P (Renard *et al.* 1997, Millward y Mersey 1999).

Las capas digitales de todos los factores (con excepción de la del LS, que se obtuvo mediante el programa USLE2D) se generaron con el SIG IDRISI. El mismo SIG se utilizó para aplicar el modelo USLE en cada una de las áreas de estudio y así obtener las tasas de erosión potencial y las de las zonas que ya se encontraban erosionadas en 1996.

#### f) Estimación de las tasas de erosión

Las tasas potenciales de erosión se estimaron para las estaciones húmeda y seca. Después de aplicar el modelo USLE se hizo una reclasificación, tomando como referencia las cinco clases establecidas por Millward y Mersey (1999): mínima (0 a  $<1 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ); baja (1 a  $<10 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ); moderada (10 a  $<30 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ); alta (30 a  $<100 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ); extrema ( $>100 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ).

Para estimar las tasas de erosión de las zonas que se encontraban erosionadas en 1996 se aplicó el modelo USLE conservando las capas digitales de los factores longitud e inclinación de la pendiente (LS), de erosividad (R) y por prácticas de conservación (P). Se crearon nuevas capas digitales de cobertura vegetal (C) y erosionabilidad del suelo (K) a partir de los datos colectados en el campo, en puntos representativos de las zonas erosionadas. Una vez obtenido el mapa resultante de el modelo USLE para cada área, se multiplicó por el mapa de erosión de 1996 correspondiente (Figuras 3.4b, 3.5b y 3.6b), que es un mapa binario en donde sólo las zonas erosionadas tienen valor 1. De esta manera sólo se estimaron las tasas de erosión de las zonas erosionadas.

## 4.4 RESULTADOS

### 4.4.1 Análisis del impacto de la ganadería en las propiedades físicas y químicas de los suelos

En el Cuadro 4.1 se presentan los resultados de las pruebas de *t* aplicadas a las variables físicas y químicas del suelo. De acuerdo con estas pruebas, sí se encontraron diferencias significativas en varios parámetros del suelo entre las dos parcelas (pH, contenido de arcilla, de arena, de nitratos y de hierro), la mayoría de ellas en la capa sub-superficial, sugiriendo que el pastoreo por ganado bovino efectivamente tiene algún efecto sobre las propiedades físicas y químicas de los suelos.

Cuadro 4.1. Resultado de las pruebas de *t* aplicadas a los parámetros físicos y químicos de las muestras de suelo. n = 10; g.l. = 18. Nivel de significancia: \* =  $p \leq 0.05$ ; \*\* =  $p \leq 0.001$   
(E) = Parcela excluida al pastoreo; (NE) = Parcela no excluida al pastoreo;  
Desv. Std. = desviación estándar

| Variables  | Promedio<br>(E) | Desv.<br>Std. | Promedio<br>(NE) | Desv.<br>Std. | <i>t</i>      | p              |
|--|-----------------|---------------|------------------|---------------|---------------|----------------|
| Profundidad 0-5 cm                                       |                 |               |                  |               |               |                |
| Materia orgánica (%)                                     | 3.080           | 2.38          | 2.256            | 1.07          | 0.996         | 0.332          |
| Arena (%)  | 83.049          | 5.68          | 86.670           | 2.60          | -1.831        | 0.083          |
| Limo (%)   | 11.300          | 4.00          | 10.500           | 3.60          | 0.470         | 0.643          |
| <b>Arcilla (%)</b>                                       | 8.006           | 2.31          | 6.130            | 0.88          | <b>2.402</b>  | <b>0.027 *</b> |
| pH   | 6.770           | 0.31          | 6.810            | 0.34          | -0.0281       | 0.781          |
| Cond. eléctrica ( $\mu S\ cm^{-1}$ )                     | 235.710         | 98.09         | 216.520          | 59.02         | 0.530         | 0.602          |
| Calcio ( $meq\cdot 100g\ suelo^{-1}$ )                   | 396.387         | 203.37        | 338.056          | 114.24        | 0.790         | 0.439          |
| Magnesio ( $meq\cdot 100g\ suelo^{-1}$ )                 | 90.713          | 38.35         | 86.934           | 35.23         | 0.229         | 0.821          |
| Sodio ( $meq\cdot 100g\ suelo^{-1}$ )                    | 0.345           | 0.19          | 0.269            | 0.29          | 0.680         | 0.504          |
| Potasio ( $meq\cdot 100g\ suelo^{-1}$ )                  | 0.072           | 0.04          | 0.122            | 0.15          | -0.984        | 0.337          |
| Hierro ( $meq\cdot 100g\ suelo^{-1}$ )                   | 77.460          | 52.15         | 60.239           | 46.66         | 0.778         | 0.446          |
| Bicarbonatos ( $meq\cdot 100g\ suelo^{-1}$ )             | 476.727         | 226.85        | 453.773          | 137.17        | 0.273         | 0.787          |
| Nitratos ( $meq\cdot 100g\ suelo^{-1}$ )                 | 0.497           | 0.11          | 0.574            | 0.18          | -1.139        | 0.269          |
| % de nitrógeno total                                     | 0.141           | 0.13          | 0.113            | 0.05          | 0.648         | 0.524          |
| % de nitrógeno asimilable                                | 0.001           | 0.00          | 0.001            | 0.00          | 0.935         | 0.362          |
| Profundidad 5-15 cm                                      |                 |               |                  |               |               |                |
| Materia orgánica (%)                                     | 2.711           | 1.60          | 1.809            | 2.02          | 1.108         | 0.282          |
| <b>Arena (%)</b>   | 78.248          | 10.32         | 85.417           | 2.94          | <b>-2.113</b> | <b>0.048 *</b> |
| Limo (%)   | 15.50           | 11.64         | 12.60            | 8.49          | 0.636         | 0.532          |
| <b>Arcilla (%)</b>                                       | 11.084          | 6.30          | 6.571            | 0.74          | <b>2.248</b>  | <b>0.037 *</b> |
| <b>pH</b>  | 6.841           | 0.28          | 6.582            | 0.16          | <b>2.507</b>  | <b>0.021 *</b> |
| Cond. Eléctrica ( $\mu S\ cm^{-1}$ )                     | 93.880          | 21.15         | 109.390          | 60.54         | -0.764        | 0.454          |
| Calcio ( $meq\cdot 100g\ suelo^{-1}$ )                   | 136.672         | 28.26         | 153.788          | 74.27         | -0.681        | 0.504          |
| Magnesio ( $meq\cdot 100g\ suelo^{-1}$ )                 | 39.410          | 11.86         | 48.570           | 31.86         | -0.852        | 0.405          |
| Sodio ( $meq\cdot 100g\ suelo^{-1}$ )                    | 0.523           | 0.38          | 0.250            | 0.19          | 2.01          | 0.058          |
| Potasio ( $meq\cdot 100g\ suelo^{-1}$ )                  | 0.033           | 0.02          | 0.072            | 0.05          | -1.948        | 0.067          |
| <b>Hierro (<math>meq\cdot 100g\ suelo^{-1}</math>)</b>   | 152.672         | 56.00         | 61.112           | 52.03         | <b>3.787</b>  | <b>0.001**</b> |
| Bicarbonatos ( $meq\cdot 100g\ suelo^{-1}$ )             | 159.581         | 37.15         | 204.052          | 105.25        | -1.259        | 0.223          |
| <b>Nitratos (<math>meq\cdot 100g\ suelo^{-1}</math>)</b> | 0.416           | 0.115         | 0.561            | 0.136         | <b>-2.573</b> | <b>0.019*</b>  |
| % de nitrógeno total                                     | 0.166           | 0.37          | 0.053            | 0.04          | 0.966         | 0.346          |
| % de nitrógeno asimilable                                | 0.00            | 0.00          | 0.00             | 0.00          | -0.019        | 0.984          |

g.l. = grados de libertad

#### 4.4.2 Relación de áreas afectadas y ubicación de los ranchos y caminos de acceso

Las Figuras 4.1, 4.2 y 4.3 muestran el sobrelapamiento de la imagen de erosión de 1996 con la vecindad a los caminos y a los ranchos para cada una de las áreas de estudio. Se observa que la mayor cantidad de píxeles de erosión contiguos, que representan amplias superficies afectadas, se localiza en estas franjas.

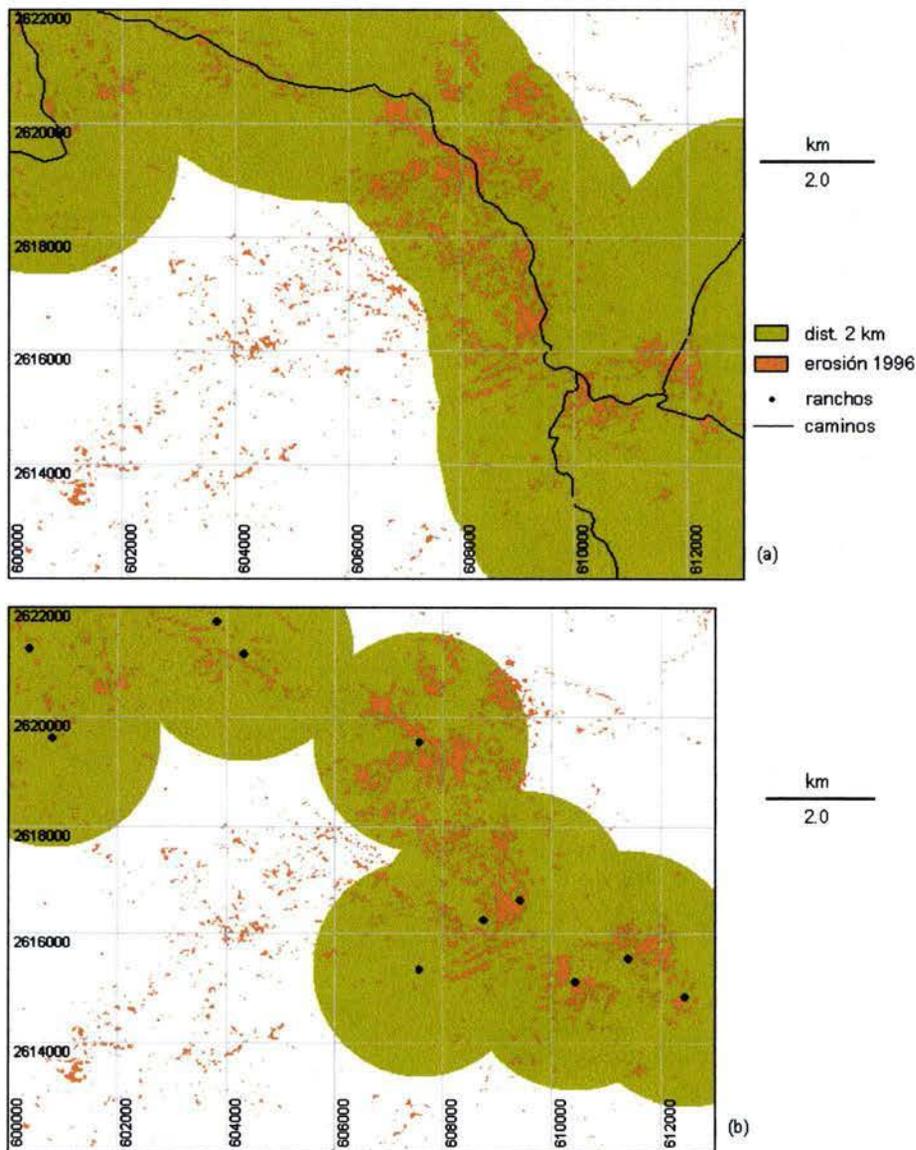


Figura 4.1. Area San Antonio de la Sierra. Sobrelapamiento de las unidades de erosión con (a) vecindad a los caminos; (b) vecindad a los ranchos.

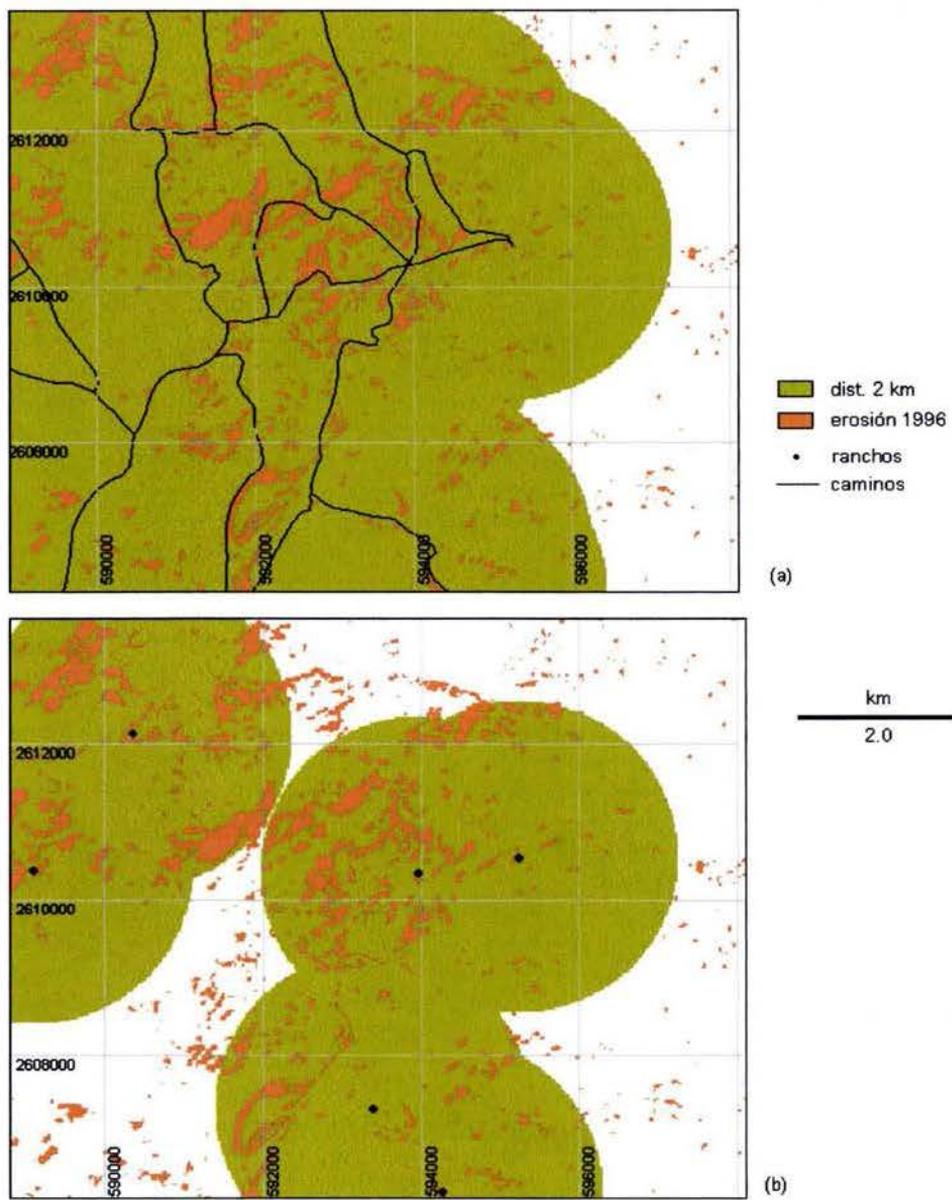


Figura 4.2. Area El Crucero. Sobrelapamiento de las unidades de erosión con (a) vecindad a los caminos; (b) vecindad a los ranchos.

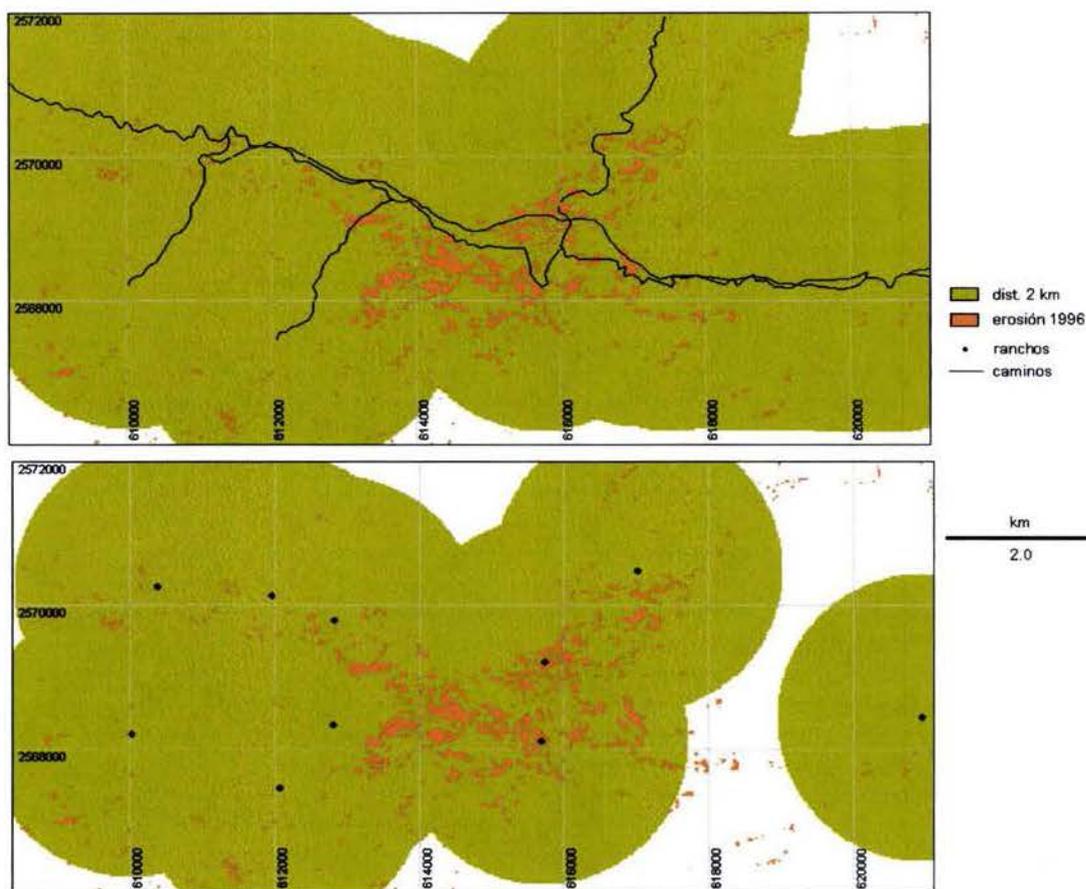


Figura 4.3. Área Cañada de Los Naranjos. Sobre lapamiento de las unidades de erosión con (a) vecindad a los caminos; (b) vecindad a los ranchos.

El Cuadro 4.2 muestra el porcentaje de superficie erosionada contenida en los buffers de 2 km de estos rasgos. Los resultados indican que el mayor porcentaje de la superficie erosionada se localiza en la franja de dos kilómetros a los ranchos y caminos en todas las áreas de estudio.

Cuadro 4.2. Superficie erosionada contenida en los buffers de caminos y ranchos, y porcentaje con respecto al total estimado para cada área.

| AREA DE ESTUDIO          | Superficie erosionada (ha) a 2 km de los caminos | % del total | Superficie erosionada (ha) a 2 km de los ranchos | % del total |
|--------------------------|--|-------------|--|-------------|
| San Antonio de la Sierra | 594  | 80.7        | 592  | 80.4        |
| El Crucero               | 585  | 97.0        | 488  | 80.9        |
| Los Naranjos             | 237  | 98.7        | 227  | 94.6        |

En el Cuadro 4.3 se presentan los porcentajes de superficie erosionada de cada una de las áreas de estudio. De acuerdo con los resultados, El Crucero es el área con mayor porcentaje de erosión, seguida por San Antonio de la Sierra y finalmente por la Cañada de Los Naranjos.

Cuadro 4.3. Superficie total de las áreas de estudio, y porcentaje de superficie erosionada para cada área.

| AREA DE ESTUDIO          | Superficie total del área de estudio (ha) | Superficie erosionada total (ha) | % de superficie erosionada |
|--------------------------|---|----------------------------------|----------------------------|
| San Antonio de la Sierra | 13,000                                    | 736                              | 5.66                       |
| El Crucero               | 6,975                                     | 603                              | 8.64                       |
| Los Naranjos             | 7,620                                     | 240                              | 3.15                       |

En el Cuadro 4.4 se presentan los resultados de la longitud total de caminos para cada área y el número de tramos que componen la red vial. Se puede observar que la red más compleja resultó ser la del área El Crucero, seguida por la Cañada de Los Naranjos y finalmente por San Antonio de la Sierra.

Cuadro 4.4. Longitud total, número de tramos y longitud promedio de los caminos.

| AREA DE ESTUDIO          | Longitud total de caminos en el área (km) | No. de tramos en la red de caminos | Longitud promedio de cada tramo (km) |
|--------------------------|---|------------------------------------|--------------------------------------|
| San Antonio de la Sierra | 28.465                                    | 6                                  | 4.744                                |
| El Crucero               | 44.327                                    | 25                                 | 1.773                                |
| Los Naranjos             | 37.287                                    | 18                                 | 2.072                                |

La Figura 4.4 muestra la red de caminos de cada una de las áreas. Se puede observar que la red de San Antonio de la Sierra es la más simple. En la Cañada de Los Naranjos se encontraron varios tramos que seguían la misma dirección debido a que, cuando el camino más antiguo se volvió intransitable, en lugar de darle mantenimiento se abrió uno nuevo, lo que es una práctica común en la península. Esta es probablemente una de las razones por las que la red de caminos de El Crucero resultara tan compleja.

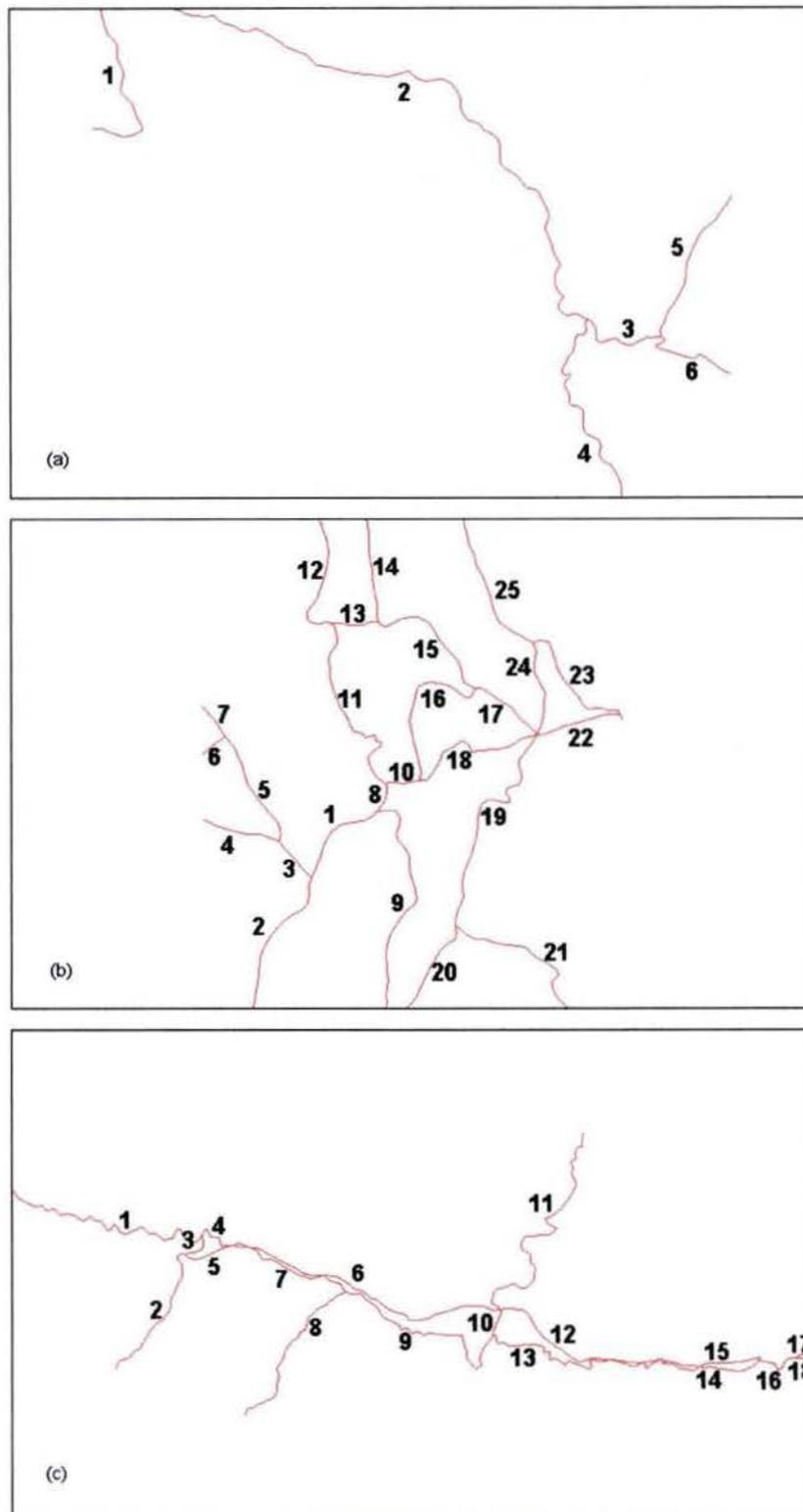


Figura 4.4. Red de caminos de las áreas de estudio: (a) San Antonio de la Sierra; (b) El Crucero; (c) Cañada de Los Naranjos. La numeración sólo indica los tramos que conforman la red, no su antigüedad.

#### 4.4.3 Tasas de erosión con base en el modelo USLE; análisis espacial de la erosión potencial y su correspondencia con las zonas erosionadas en 1996.

En las Figuras 4.5, 4.6 y 4.7 se presentan los mapas de erosión potencial de cada una de las áreas para las estaciones húmeda y seca. En todos los casos, las mayores tasas de erosión se estimaron para las zonas con mayor pendiente y durante las estaciones húmedas.

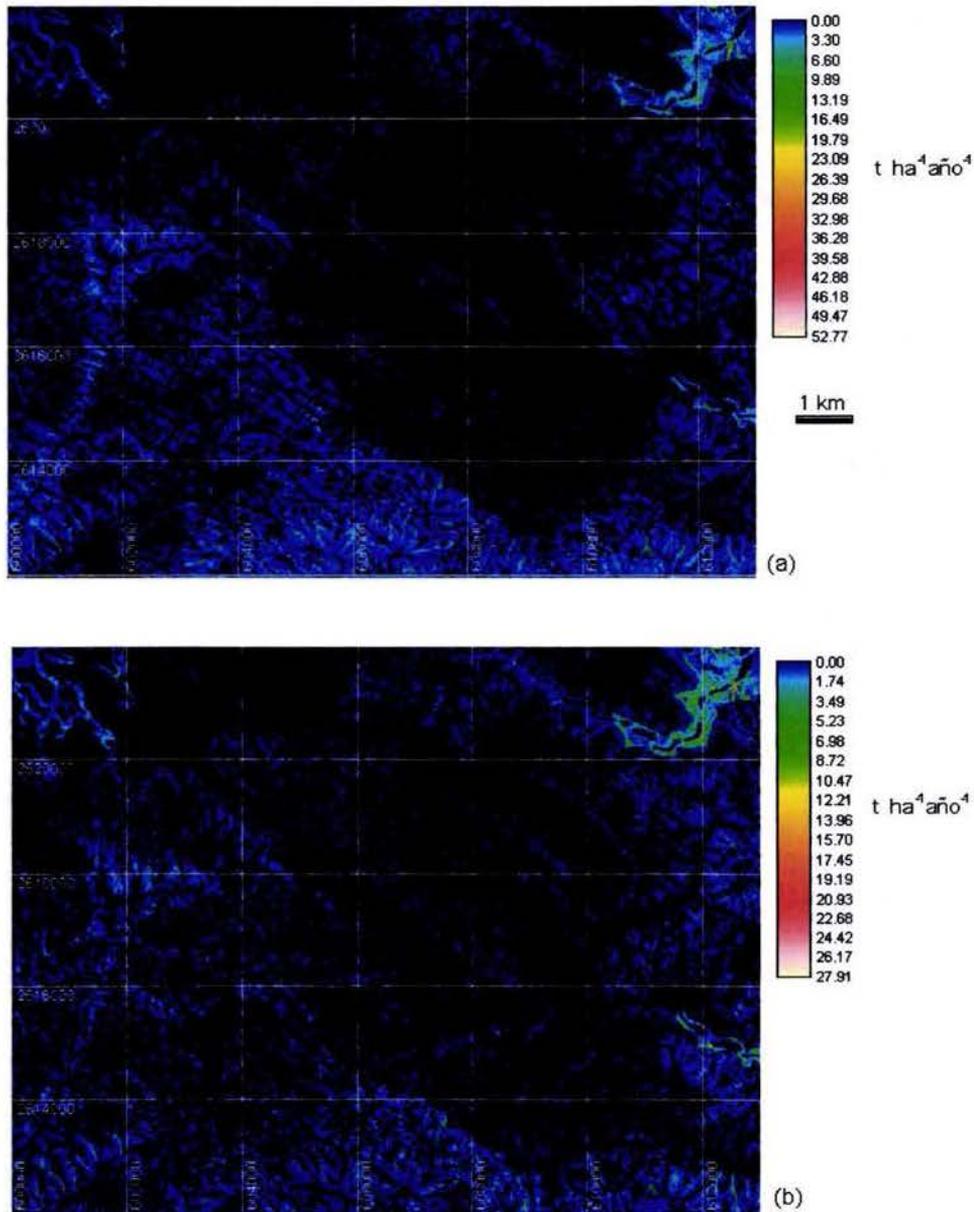


Figura 4.5. Mapas de erosión potencial del área San Antonio de la Sierra.  
(a) Estación húmeda; (b) estación seca

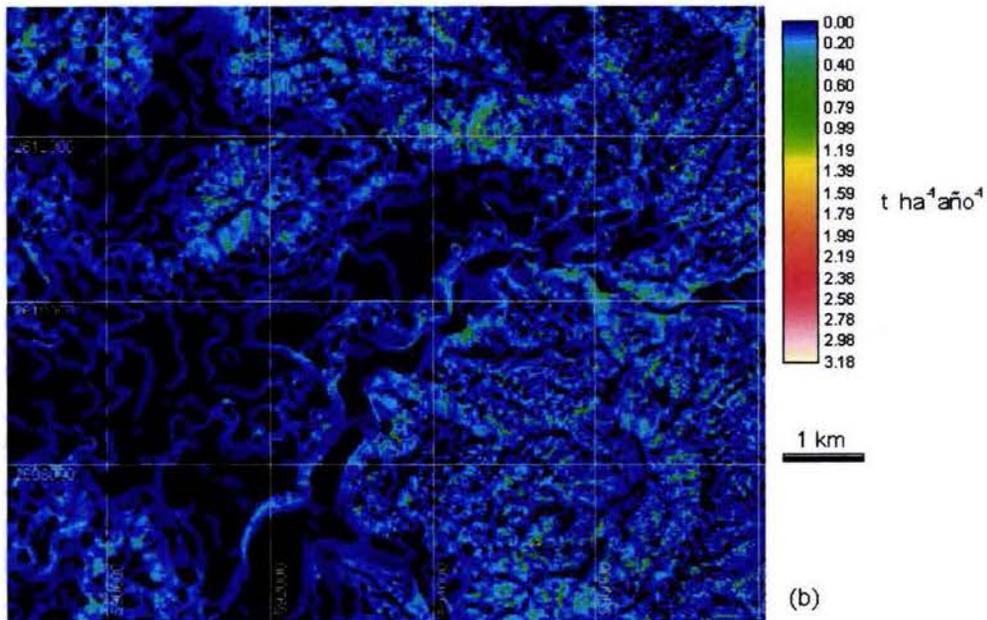
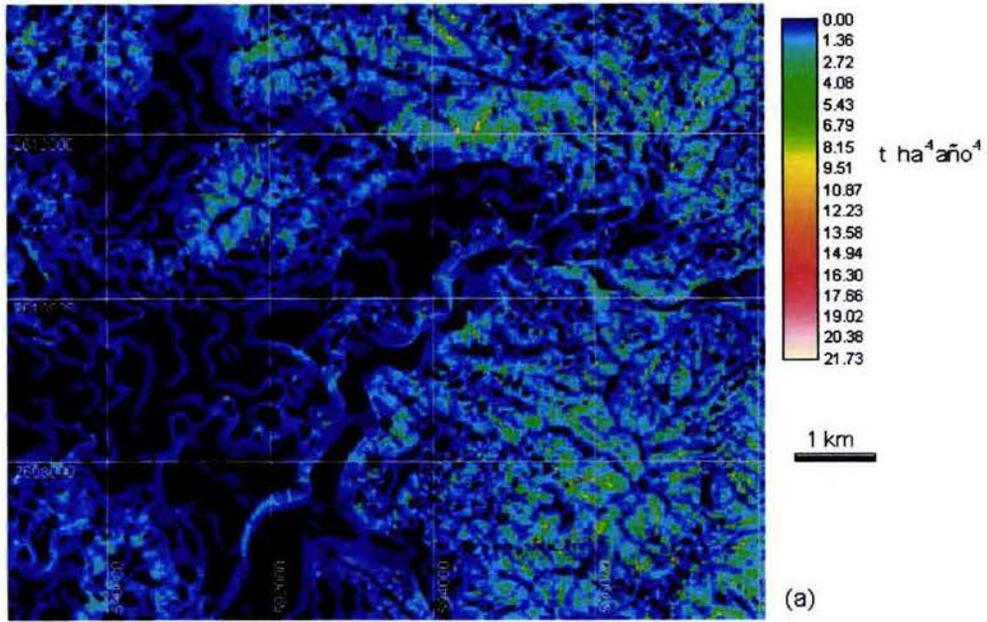


Figura 4.6. Mapas de erosión potencial del área El Crucero.  
 (a) Estación húmeda; (b) estación seca

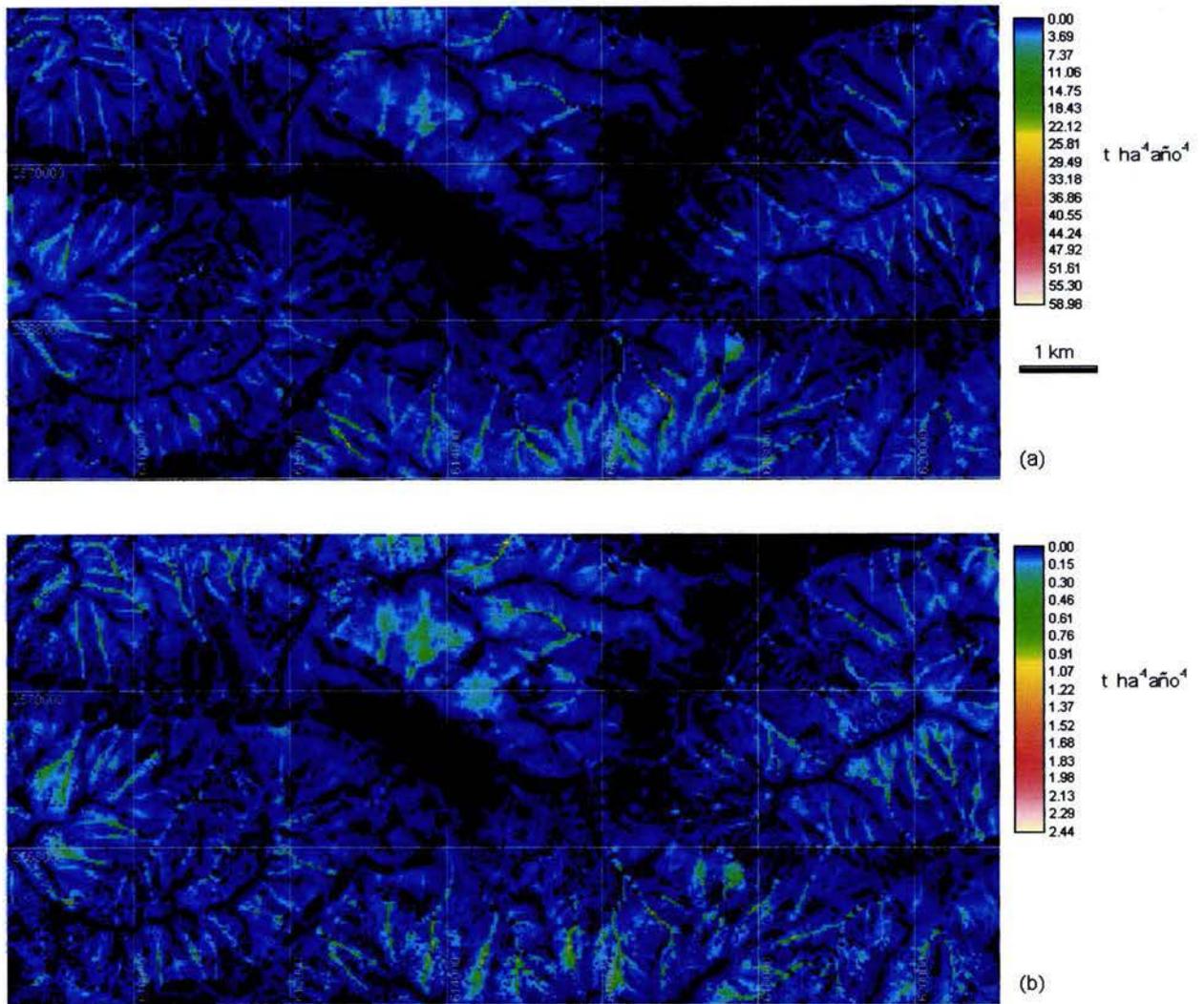
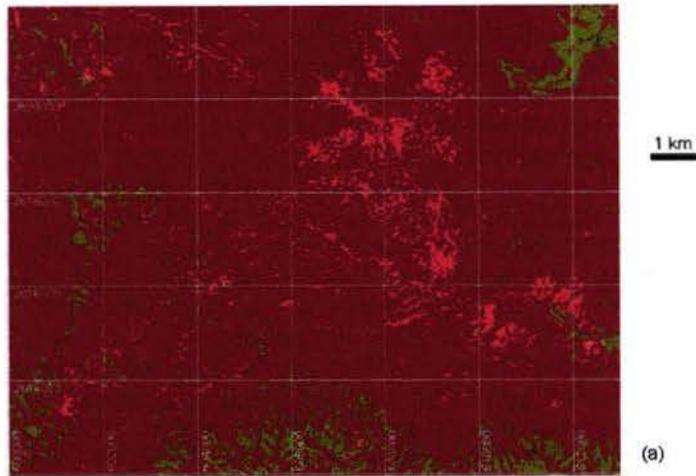
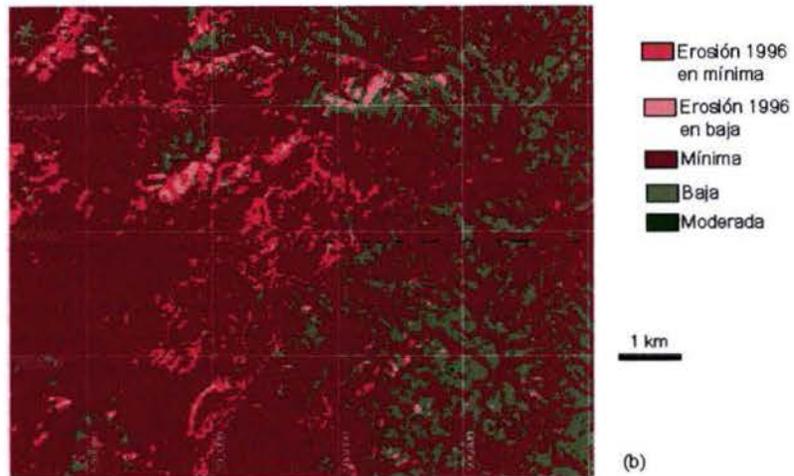


Figura 4.7. Mapas de erosión potencial del área Cañada de Los Naranjos.  
 (a) Estación húmeda; (b) estación seca

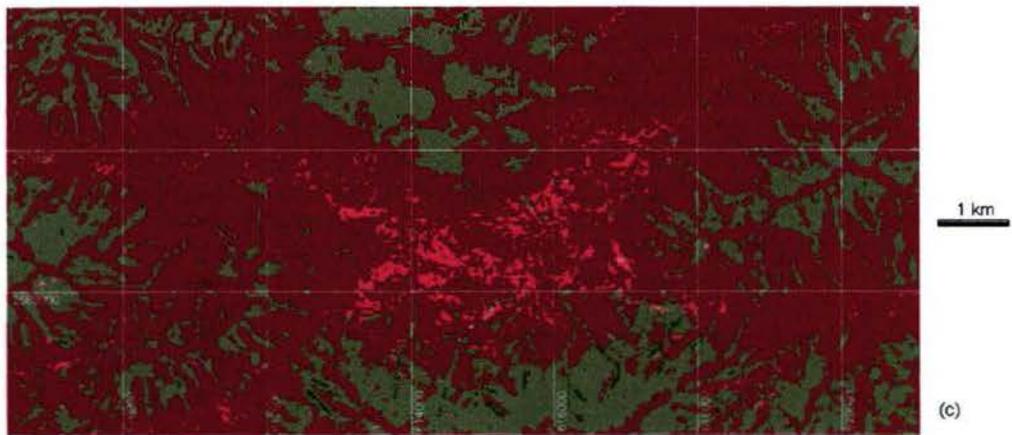
En la Figura 4.8 se muestran los mapas de erosión potencial reclasificados de cada área, a los que se sobrelapó el mapa de erosión de 1996 correspondiente. De acuerdo con la figura, las superficies que estaban erosionadas en 1996 se ubicaron dentro de las clases de erosión potencial mínima y baja en todas las áreas de estudio.



(a)



(b)



(c)

Figura 4.8. Clases de erosión de cada área de estudio y superposición de las zonas erosionadas en 1996. (a) San Antonio de la Sierra; (b) El Crucero; (c) Cañada de Los Naranjos

En el Cuadro 4.5 se presentan las tasas máximas de erosión potencial estimadas para cada estación y para las zonas erosionadas en 1996. Los resultados señalan que las tasas de erosión estimadas para las zonas erosionadas de las áreas El Crucero y Cañada de Los Naranjos duplican las que se esperarían en condiciones naturales durante la estación húmeda.

Cuadro 4.5. Tasas de erosión potencial y de las zonas erosionadas en 1996, estimadas por el modelo USLE.

| Áreas de estudio         | Tasas máximas de erosión ( $t\ ha^{-1}\ año^{-1}$ ) |                  |                      |
|--------------------------|---|------------------|----------------------|
|                          | En estación húmeda                                  | En estación seca | En zonas erosionadas |
| San Antonio de la Sierra | 52.77   | 27.91            | 35.13                |
| El Crucero               | 21.73   | 3.18             | 53.02                |
| Cañada de Los Naranjos   | 58.98   | 2.44             | 124.08               |

En el Cuadro 4.6 se presentan los porcentajes de superficie erosionada en 1996 que se ubicaron dentro de cada categoría de erosión. Se puede observar que el mayor porcentaje de las zonas erosionadas se encontró en la clase de erosión mínima.

Cuadro 4.6. Superficie y porcentaje de las zonas erosionadas de 1996 que se ubicaron dentro de cada clase de erosión potencial

| Áreas de estudio         | Clasificación de las tasas de erosión       |        |  |         |   |         |
|--------------------------|---|--------|--|---------|---|---------|
|                          | Mínima<br>(0 a $<1\ t\ ha^{-1}\ año^{-1}$ ) |        | Baja<br>(1 a $<10\ t\ ha^{-1}\ año^{-1}$ ) |         | Moderada<br>(10 a $<30\ t\ ha^{-1}\ año^{-1}$ ) |         |
| San Antonio de la Sierra | 724.62 ha                                   | (98 %) | 11.50 ha                                   | (1.5 %) | 0.06 ha   | (0.5 %) |
| El Crucero               | 484.00 ha                                   | (80 %) | 119.00 ha                                  | (20 %)  |   |         |
| Cañada de Los Naranjos   | 224.00 ha                                   | (93 %) | 16.00 ha                                   | (6.5 %) | 0.062 ha  | (0.5 %) |

## 4.5 DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

### 4.5.1 Análisis del impacto de la ganadería en las propiedades físicas y químicas del suelo

Los resultados obtenidos del experimento de exclusión a la ganadería, los cuales sólo dan una idea parcial de lo que está ocurriendo en la Sierra de la Laguna, no presentaron diferencias

significativas entre las dos condiciones en cuanto al contenido de materia orgánica del suelo. El no haber encontrado tal diferencia sugiere que la materia orgánica producida por el ganado se podría estar reintegrando rápidamente al suelo, además en cantidad suficiente para equiparar los valores de la parcela excluida.

El contenido significativamente mayor de nitratos que se encontró en la parcela sometida a pastoreo señala mayores procesos de nitrificación en esta condición. Esto puede explicarse por el aporte directo de compuestos amoniacales en heces y orina del ganado, que constituyen un sustrato directo para que se lleve a cabo la nitrificación. En la parcela excluida, por el contrario, en donde se está llevando a cabo el ciclo normal del nitrógeno, se requieren varias etapas de descomposición para lograr la liberación del amonio a partir de los restos orgánicos, mayormente vegetales, depositados en el suelo. Por otra parte, a mayor nitrificación, el pH se abate, lo que explica que éste resultara significativamente menor en la parcela sometida a pastoreo (Duchaufour 1995).

El contenido de hierro fue significativamente mayor en la parcela excluida al pastoreo. Esto se debe a que la solubilidad del hierro, como la de todos los oligoelementos, disminuye cuando aumenta el pH, reduciendo su lixiviación o aprovechamiento por las plantas con respecto a la parcela sometida (Duchaufour 1995).

Existe información que indica que en los sitios sometidos por largos periodos a pastoreo intenso se produce un decremento en el contenido total de nitrógeno, en la capacidad de intercambio catiónico y en el contenido de calcio y magnesio intercambiables en los sitios más pastoreados (Ayuba 2001, Turner 1998). Los resultados obtenidos sugieren que tal fenómeno se presenta en el sitio de estudio, pues estos parámetros tuvieron valores superiores en la parcela excluida al pastoreo. Aunque cabe señalar que las diferencias no fueron estadísticamente significativas, las que se encontraron a tan sólo ocho años de exclusión al pastoreo sugieren que existe una tendencia que confirmaría esta situación.

Las diferencias que se encontraron en la textura (mayor contenido de arcilla en la parcela excluida y mayor contenido de arena en la parcela sometida al pastoreo), parecen indicar que existe mayor humedad en la parcela excluida al pastoreo. Por una parte, la permanencia del estrato herbáceo aumenta la tasa de infiltración en el suelo, al servir las plantas mismas como conductoras de la humedad al interior del suelo; por otra parte, su cobertura abate la temperatura del suelo y por lo tanto disminuye la evaporación. El aumento en la infiltración se comprueba con los resultados de contenido de arcillas en ambos estratos de la parcela excluida, partiendo del hecho de que la

formación de arcillas requiere condiciones de humedad. Se puede afirmar que existe además transporte vertical de las arcillas del estrato superficial, que se suman a las que se están formando en el mismo estrato sub-superficial, aunque todavía no en cantidad suficiente para la formación de cutanes conspicuos. El mayor contenido de arcilla es importante por su propia capacidad de retención de humedad, además de que fomenta la formación de agregados y por lo tanto aumenta la estabilidad del suelo, sin contar con que incrementa la capacidad de intercambio catiónico.

Cualquier modificación en el hábitat que produzca alteraciones en la disponibilidad de residuos orgánicos, en la aireación del suelo o cualquier otro factor que afecte a los microorganismos se verá reflejado en variaciones en las tasas de adición y volatilización del carbono, es decir, en variaciones en ciclos biogeoquímicos tales como el del carbono y el del nitrógeno (Hartmann *et al.* 1997). En nuestro caso se encontraron diferencias en la humedad, el pH y la calidad de la materia orgánica "fresca", todos ellos muy importantes para los microorganismos del suelo, de tal manera que se puede afirmar que los ciclos biogeoquímicos que se están llevando a cabo en ambas condiciones son muy diferentes.

Las diferencias encontradas en las características químicas del suelo no parecen influir directamente en los procesos de erosión que se presentan en las zonas sometidas a la ganadería extensiva de la Sierra de la Laguna. Es la eliminación de la cobertura vegetal, particularmente el estrato herbáceo, y los cambios que se pudieron detectar en las características físicas del suelo los que parecen ser lo suficientemente importantes para explicar el deterioro progresivo del suelo. El aumento de partículas finas en la parcela excluida a la ganadería nos está indicando que en esta condición son mayores la tasa de infiltración, el contenido de humedad y la estabilidad del suelo. Además, se sabe que la suma de condiciones de sequía y la presión de pastoreo, sobre todo por la acción mecánica que ejerce el ganado (compactación, destrucción de la estructura de los agregados), dan por resultado un aumento en la erosión (Parizek *et al.* 2002). A todo esto se suma la eliminación de la cubierta vegetal protectora, que aumenta la superficie de suelo desnudo que queda sometido a mayor radiación, a cambios drásticos en la temperatura a lo largo del día (Arriaga *et al.* en 1993 reportaron diferencias de temperatura de casi 20°C bajo el dosel y en sitios abiertos en la misma localidad) y al impacto directo de la lluvia.

Cabe subrayar nuevamente que con este experimento de exclusión a la ganadería no se pretende representar lo que está sucediendo en toda la selva baja caducifolia de la Sierra de la Laguna que está sometida al pastoreo por ganado bovino. Sin embargo, los resultados obtenidos

tienen validez local en las condiciones del experimento, además de que son útiles al ofrecer una primera aproximación de los procesos que podrían estar sucediendo en el ecosistema.

#### 4.5.2 Relación de áreas afectadas y ubicación de los ranchos y caminos de acceso

El mayor porcentaje de la superficie erosionada en 1996 se encuentra dentro del buffer de 2 km a los caminos y los ranchos en todas las áreas de estudio (Cuadro 4.2). Además, de acuerdo con los resultados obtenidos, la complejidad de la red de caminos, representada por el número de tramos que los componen, parece tener influencia sobre la superficie erosionada (Cuadro 4.4). Esto parece ser cierto en el área El Crucero, que tiene la red de caminos más compleja (25 tramos) y el mayor porcentaje de superficie erosionada de las tres áreas (8.64 %). Cabría esperar que la Cañada de Los Naranjos, con una red de caminos de 18 tramos, le siguiera en porcentaje de superficie erosionada. Sin embargo, Los Naranjos es el área que tiene la menor superficie erosionada (3.15 %). Esto podría explicarse porque el camino en la Cañada de Los Naranjos está trazado en la parte baja de la cañada, es decir, en una zona de acumulación, en tanto que en El Crucero muchos de los tramos corren sobre los parteaguas de los cerros, convirtiéndose en verdaderos focos de erosión. San Antonio de la Sierra por su parte, tiene la red de caminos más simple, pero es evidente que las zonas más afectadas por la erosión se encuentran en las cercanías de los caminos y los ranchos (Figura 4.1).

Estos resultados concuerdan con los de Ramírez (2001), quien en su estudio sobre áreas críticas para la biodiversidad en la Sierra de la Laguna estableció que la abundancia y ocurrencia de plantas disminuye en la cercanía a los ranchos, dado que la extracción de los recursos naturales se incrementa con la cercanía a los centros de consumo y a la infraestructura para transportar los recursos, es decir, a los caminos. También encontró que las modificaciones al hábitat en la Sierra de la Laguna parecen ocurrir a nivel local, dado que las que ocurren en las zonas cercanas a los ranchos son significativas para algunas especies de plantas y animales.

Los resultados obtenidos en este apartado apoyan la hipótesis planteada sobre la asociación que existe entre las actividades humanas y la erosión del suelo en la Sierra de la Laguna.

#### 4.5.3 Tasas de erosión con base en el modelo USLE; análisis espacial de la erosión potencial y su correspondencia con las zonas erosionadas en 1996.

La generación de cada una de las capas digitales que se requirieron para aplicar el modelo USLE estuvo sujeta a las limitaciones derivadas de los métodos utilizados para obtener los valores de los factores. Sin embargo, el contar con información de campo, la obtenida por los análisis físicos y químicos de las muestras de suelo, los registros de por lo menos 40 años de precipitación y el modelo digital de elevación generado a partir de curvas de nivel cada 20 m, permitieron minimizar estos errores en la medida de lo posible.

Los resultados al aplicar el modelo USLE demostraron que, como era de esperarse, las zonas con mayores pendientes eran potencialmente más susceptibles a la erosión y que las tasas de erosión esperadas serían muchísimo mayores durante la estación húmeda. Sin embargo, como se puede observar en las Figuras 4.5b, 4.6b y 4.7b, durante la estación seca la susceptibilidad aumenta, a pesar de que son menores las tasas de erosión potencial. Esto se explica por el carácter caducifolio de la vegetación.

Al sobrelapar el mapa de las zonas ya erosionadas en 1996 con el mapa de clases de erosión (Figura 4.5) se hace evidente que la mayor parte de la superficie erosionada queda en la clase de tasa de erosión mínima ( $<1 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ), y que se presentan tasas de erosión mayores, estimadas entre las 35 y las  $124 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  (Cuadro 4.5), dependiendo de la localidad.

Todos estos resultados apoyan la hipótesis de que la erosión que existe actualmente en las tres áreas de estudio se relaciona con las actividades humanas en la Sierra de la Laguna.

Con base en lo expresado se puede concluir que:

- La erosión del suelo en la Sierra de la Laguna está estrechamente relacionada con las actividades humanas
- La ganadería promueve la erosión por la acción mecánica que afecta las propiedades físicas del suelo, no por los cambios que provoca en sus propiedades químicas.
- La erosión que se observa actualmente es el resultado de procesos desarrollados durante largos intervalos de tiempo.

Para proponer soluciones a un problema es necesario reconocer que éste existe. La información generada en este trabajo representa un avance en el conocimiento sobre la erosión real y potencial en las áreas más afectadas por este fenómeno de la Sierra de la Laguna y puede servir

para apoyar a los encargados de la planeación y manejo de los recursos naturales, particularmente los de la Reserva de la Biosfera Sierra de la Laguna. Sin embargo, no basta con saber dónde, cuánto y por qué. Además de brindar elementos para establecer el control sobre las actividades humanas para minimizar su impacto es necesario buscar alternativas para la rehabilitación de los suelos erosionados. En el siguiente capítulo se abordará el tema de las cortezas microbióticas y el potencial de algunas cianobacterias nativas de la Sierra de la Laguna como mejoradoras de las propiedades físicas y químicas del suelo.

## 5. DESCRIPCIÓN DE LA NATURALEZA MICROBIANA DE SUELOS EROSIONADOS DE LA SIERRA DE LA LAGUNA

### 5.1 INTRODUCCIÓN

Como se mencionó anteriormente, en algunas zonas erosionadas dentro de la selva baja caducifolia de la Sierra de la Laguna, particularmente en el área El Crucero, se encontraron abundantes estructuras macroscópicas de naturaleza biológica, que la literatura define como cortezas de microorganismos, creciendo en una estrecha franja localizada entre la vegetación natural y las áreas fuertemente erosionadas, en la que ya no existía mantillo y la vegetación era muy abierta (Fig. 5.1a). Durante la estación húmeda los límites de las superficies cubiertas por las cortezas se observaban claramente debido a que eran abundantes las hierbas anuales que crecían en ellas, sobre todo los pastos (Fig. 5.2).

En los sitios en donde se encontraron, algunas lomas aún conservaban parches de vegetación en relativamente buen estado en la parte más alta, en tanto que en las laderas era común que se presentaran sólo pequeñas agrupaciones de individuos (o cúmulos) formando montículos dispersos en las zonas más erosionadas. En cada cúmulo había un individuo dominante, que al parecer retenía el suelo con sus raíces y proporcionaba sombra a los demás.

Se pudieron observar varias etapas de estabilidad-degradación de estos cúmulos. En los que se llamó "estables", el suelo retenido cubría totalmente las raíces y todos los individuos del cúmulo parecían estar en buen estado fisiológico. En todos ellos se encontraron cortezas de microorganismos en la superficie del suelo (Fig. 5.1b), observándose incluso en caras verticales.

Otros cúmulos ("degradados"), se caracterizaron porque el individuo dominante había sido atacado por alguna plaga (sobre todo en el caso de las cactáceas) o presentaba señales de haber perdido vigor, mostrando algunas ramas secas o la falta de follaje aún en la temporada de lluvias. En la mayoría de los casos las raíces habían quedado expuestas y algunos de los individuos más jóvenes habían muerto, posiblemente no sólo por este motivo, sino por el exceso de radiación al perder el individuo dominante el follaje. En estos cúmulos las cortezas de microorganismos estaban fraccionadas o pobremente representadas. Se podía observar que algunas habían sido sepultadas por sedimentos provenientes de la parte alta de la ladera.

De muchos cúmulos ("extintos"), sólo quedaba como evidencia el tocón o el esqueleto leñoso del individuo dominante, arraigado prácticamente a la roca. En este caso ya no se observaban ni acumulación de suelo ni rastros de las cortezas de microorganismos.

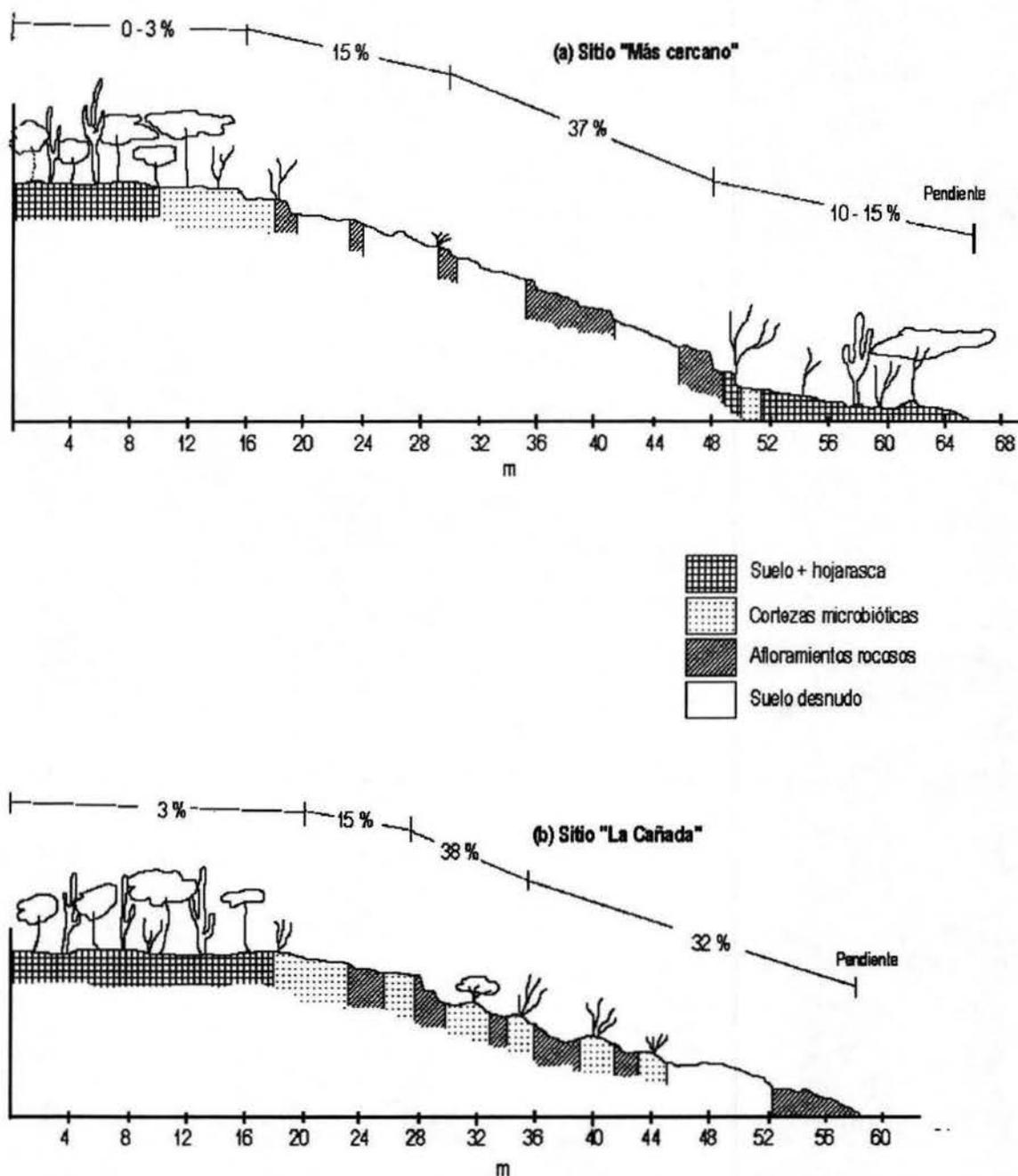


Fig. 5.1. Esquema de los dos sitios de muestreo del área El Crucero. Las pantallas representan únicamente lo que se registró en la superficie del suelo.

El haber encontrado las cortezas en estas condiciones llevó al planteamiento de varias preguntas acerca de su presencia y función en las zonas erosionadas de la Sierra de la Laguna.

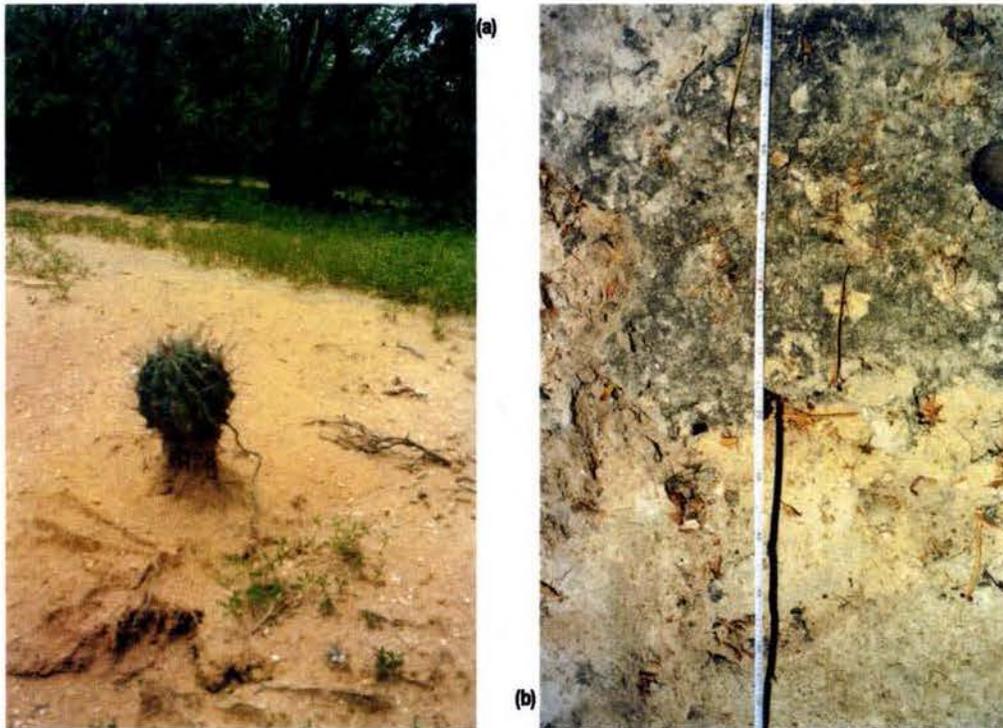


Fig. 5.2. Aspecto de las cortezas microbióticas en el campo. (a) Temporada húmeda. Sobre ellas están creciendo los pastos; se puede observar que la erosión ha eliminado varios centímetros de suelo en donde no hay cortezas. (b) Temporada seca. Vista vertical.

De acuerdo con la información recabada en la bibliografía, los primeros organismos que colonizan el suelo de las zonas áridas y semiáridas en condiciones naturales no son plantas superiores, sino estas comunidades organizadas de microorganismos, conocidas como cortezas microbióticas (*microbiotic crusts*, *criptobiotic crusts*, *desert crusts*), las cuales crecen entre o sobre las partículas de sedimento, llegando a representar el componente fotosintético en suelos en los que la vegetación de plantas superiores está ausente o restringida (Campbell *et al.* 1989, García-Pichel y Belnap 1996). Se ha encontrado que su desarrollo se presenta en etapas sucesionales, en donde los organismos pioneros son cianobacterias, en tanto que las etapas más avanzadas pueden llegar a incluir criptógamas eucarióticas como algas, líquenes y musgos (Cameron y Blank 1966, Campbell *et al.* 1989).

Las cortezas de microorganismos en zonas áridas crecen en sitios en donde la vegetación es naturalmente muy abierta o inexistente, llegando incluso a considerarse como el clímax en condiciones extremas en las que se hace difícil el establecimiento de plantas superiores (García-Pichel y Belnap 1996). También se ha reportado que podrían ser los primeros estadios de la colonización de áreas desnudas, fomentando el establecimiento de plántulas al estabilizar los sedimentos (Yeager *et al.* 2004). En este sentido, varios estudios, realizados particularmente en Australia y las zonas áridas de Estados Unidos han demostrado su importante papel en los ecosistemas como contribuyentes en la productividad primaria y la considerable mejora de las características del suelo.

Incluso se ha llegado a plantear que esta última sea la contribución más importante de las cortezas microbióticas (Johansen 1993), ya que se ha observado una reducción en la pérdida de sedimento por la fuerza erosiva del agua (Fletcher y Martin 1948) y del viento (Verrecchia *et al.* 1995), así como mayores tasas de infiltración en los suelos cubiertos con cortezas que en los de donde éstas se habían eliminado (Gifford 1978, Elridge 1993, Elridge y Greene 1994), menor pérdida de suelo en las regiones desprovistas de vegetación, sobre todo en condiciones de sequía, así como un aumento en la estabilidad de los agregados al implantar las colonias en condiciones experimentales (Bailey *et al.* 1973, Belnap y Gardner 1993). Otra característica que se ha observado es el retardamiento de la deshidratación debido a la capacidad de retención de agua que tienen las cubiertas que son características de grupos como el de las cianobacterias (Campbell *et al.* 1989). Más aún, la trama que forman sus filamentos y sus exudados contribuyen a retener las partículas del suelo (Anderson y Rushforth 1976, Campbell 1979) y la capacidad de algunos morfotipos de fijar nitrógeno atmosférico mejora las condiciones del suelo. Estudios más recientes han analizado la importancia que la productividad de las cianobacterias de las cortezas de desierto tienen en ambientes tan hostiles y empobrecidos (García-Pichel y Belnap 1996). Tales características confieren particularmente a las cianobacterias un gran potencial biotecnológico, por ejemplo, para la rehabilitación de suelos agrícolas empobrecidos (López-Cortés *et al.* 2001).

Muchos estudios se habían realizado en muestras de ambientes áridos y bosques, pero prácticamente ninguno sobre áreas climáticas transicionales, como es el caso de la Sierra de la Laguna. Además, llamaba la atención haberlas encontrado en sitios erosionados de la selva baja, dado que generalmente se les asocia con ecosistemas silvestres prístinos (Johansen 1993, Evans y Johansen 1999, Belnap y Lange 2001). Aunque la bibliografía reportaba su desarrollo en

pendientes planas o muy suaves, se observaron en pendientes variadas, incluso en caras verticales. Asimismo, se pudieron reconocer diferentes tipos morfológicos de cortezas que sugerían que estaban conformadas por diferentes especies de microorganismos.

Varias preguntas surgieron de las observaciones realizadas :

- a) ¿La presencia de las cortezas, particularmente las que se encuentran en la base de las plantas que restan como testigos de la que fue en el pasado una comunidad vegetal en buen estado, sugieren su participación en la mejora de la calidad del suelo ?
- b) ¿Su influencia se limita únicamente a mejorar características físicas del suelo tales como la agregación, o podrían ser importantes para la vegetación como fijadoras de nitrógeno?
- c) ¿Existe una relación entre la diversidad de las especies de microorganismos que conforman una corteza y el aspecto de ésta?

Para dar respuesta a estas preguntas se desarrolló el estudio que se describe a continuación, el cual involucró el aislamiento y cultivo de cepas de cianobacterias, observaciones en microscopía estereoscópica, en contraste de fases y electrónica y experimentos de fijación de nitrógeno. Los resultados se publicaron en: Maya, Y., A. López-Cortés y A. Soeldner. 2002. Cyanobacterial microbiotic crusts in eroded soils of a tropical dry forest in the Baja California Peninsula, Mexico. *Geomicrobiology Journal* 19:505-518.

## 5.2 MATERIALES Y MÉTODOS

### 5.2.1 Area de estudio

El estudio se desarrolló en el área El Crucero, cuya ubicación se muestra en la Fig. 3.1 (pág. 13). La descripción del área se presentó en el Capítulo 3, apartado 3.3.3a (pág. 14).

### 5.2.2 Muestreo y reactivación de las cortezas

Se colectaron muestras secas de cortezas microbióticas en octubre de 1997. Las muestras, de aproximadamente 5 x 5 cm y 1 cm de grosor, se tomaron de la superficie del suelo y se transportaron en cajas de Petri estériles al laboratorio. Con base en las observaciones macroscópicas llevadas a cabo *in situ* fue posible diferenciar dos tipos de cortezas: planas o rugosas.

Las muestras de los dos tipos de cortezas se reactivaron agregando agua corriente pocos días después de ser colectadas. Notamos que sólo la saturación con agua conducía a la completa reactivación de las comunidades cianobacterianas, de tal manera que se mantuvieron permanentemente húmedas en condiciones controladas de temperatura e iluminación a 30 °C y 100  $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . Tal procedimiento se limitó a una semana con el fin de impedir el crecimiento de hongos, el cual se observó que ocurría después de este intervalo de tiempo.

### 5.2.3 Identificación de los morfotipos de cianobacterias

#### a) *Microscopía*

Las cortezas reactivadas se analizaron a diferentes intervalos utilizando un microscopio estereoscópico (Zeiss). Se observaron preparaciones frescas de filamentos y colonias obtenidas manualmente de diferentes talos cianobacterianos por micromanipulación, utilizando un microscopio de contraste de fases (Nikon Labophot). Posteriormente, se llevó a cabo la identificación de los diferentes morfotipos.

En este punto, es importante señalar que existen dos enfoques en cuanto a la clasificación de las cianobacterias: el botánico y el bacteriológico. Las principales diferencias entre ambos son: en el botánico, (1) generalmente se hace la descripción de los taxa a partir de un ejemplar tipo, silvestre, herborizado y (2) la descripción es esencialmente fenotípica, en la que los rasgos externos son las manifestaciones de la información genética del organismo y el resultado de interacciones complejas entre sus moléculas y el medio ambiente, que llevan a diferencias morfológicas, fisiológicas y bioquímicas reconocibles (Wilmotte 1994), aunque ya se ha planteado la introducción de rasgos genotípicos para la clasificación (Anagnostidis y Komárek 1988, Komárek y Anagnostidis 1989). En el sistema bacteriológico en cambio, (1) se utilizan cultivos que se recomienda sean axénicos, esto es, material en cultivo que ha sido sometido a diversos tratamientos hasta lograr la eliminación total de otros organismos, y (2) la introducción de nuevas tecnologías de biología molecular ha fomentado la tendencia hacia la creación de un sistema de clasificación genotípico tendiente a reflejar las relaciones filogenéticas en la medida de lo posible (Wilmotte 1994). Es por ello que para los bacteriólogos la clasificación de las cianobacterias está en proceso de transición, dado que aún se basa en gran parte en los rasgos fenotípicos de los organismos, de tal manera que, de acuerdo con Castenholtz (2001), tendrá que ser completamente revisada cuando sea posible llevar a cabo comparaciones genéticas. Reconocen

sin embargo, que un sistema de clasificación genotípico nunca podrá reemplazar completamente la identificación fenotípica de especímenes de colecciones silvestres (Holt *et al.* 1994).

En el presente trabajo, la asignación botánica de las especies se basó en el sistema de clasificación de Geitler (1932). También se buscaron las equivalencias a nivel genérico en las descripciones del *Bergey's Manual of Systematic Bacteriology* (Boone y Castenholz 2001) y en el sistema de Anagnostidis y Komárek (1988) y Komárek y Anagnostidis (1989).

Se tomaron 16 micrografías de ambos tipos de cortezas a 0.6X, 1.2X y 4.0X, con el fin de estimar la abundancia relativa de cada morfotipo cianobacteriano. Se excluyeron las superficies cubiertas por líquenes en las cortezas rugosas. Las estimaciones se basaron en el porcentaje de superficie ocupada por el talo de cada morfotipo cianobacteriano. Se definieron 5 clases: 0% = no detectado, 1-20% = presente, 20-50% = común, 50-70% = muy común y 70-100% = dominante.

#### *b) Aislamiento y cultivo*

Para facilitar la manipulación de los talos cianobacterianos pequeños y frágiles utilizamos micromanipuladores. Estos se hicieron calentando la punta de una delgada pipeta capilar Pasteur y tirando de ella con unas pinzas (Prufert-Bebout y García-Pichel 1994). De esta manera se obtuvieron puntas de diámetro más delgado que cualquier aguja de disección. Los micromanipuladores fueron muy útiles para obtener pequeñas cantidades de muestra para las preparaciones frescas. En la manipulación de cultivos fue posible tomar filamentos aislados para colocarlos en el medio de cultivo, reduciendo así los pasos necesarios para la obtención de un cultivo puro.

Los filamentos de los talos y microcolonias de los diferentes y más conspicuos morfotipos se obtuvieron de cortezas naturales reactivadas, por micromanipulación manual a menos de una semana de su colecta. Se incubaron en medios de cultivo BG11, BG11° (Rippka *et al.* 1981) y Z-8 y Z-8° (Carmichael 1986), tanto sólidos como líquidos y en condiciones controladas de temperatura e iluminación ( $30\text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $100\text{ }\mu\text{E m}^{-2}\text{ s}^{-1}$ ), para promover el crecimiento y aislamiento de las cepas. Al principio se añadió al medio de cultivo cicloheximida (Sigma Chemical Co., St. Louis, MO, USA), con el fin de eliminar las células eucarióticas (Rippka 1988). Las cepas de cianobacterias así obtenidas se preservaron en nitrógeno líquido con un crioprotector (dimetil sulfóxido al 5%).

#### *c) Microscopía electrónica de barrido (SEM)*

Se prepararon muestras representativas de cortezas planas y rugosas en condiciones húmedas y secas para su observación en microscopio electrónico de barrido. Las muestras se fijaron por 2h con glutaraldehído al 2.5% en buffer de sodio-potasio de Sorensen 0.1 M, con pH 7.2. Después del fijado, los especímenes se pasaron por una serie de etanol (concentraciones de 25-100%, 15 min / cambio), después fueron infiltrados con isoamyl acetato anhidro al 95%. Las muestras se secaron en una secadora de punto crítico (SAMDRI-PVT-3P), siguiendo el método de Anderson (1956). Los especímenes fueron montados con cinta de carbón adhesivo en monturas de aluminio y cubiertos con una capa ~8 a 10 nm de una aleación oro/paladio, 60/40 en peso porcentual, en un sistema de baño por atomización (Edwards S150B). La microscopía se hizo con un microscopio electrónico de barrido (AmRay 3300FE) en la Universidad Estatal de Oregon, Covallis, OR, USA. Las imágenes se registraron en una película Polaroid Type 55 positive-negative.

#### *d) Fijación de nitrógeno*

Para determinar la capacidad como fijadores de nitrógeno de algunos cultivos de cianobacterias, se realizó un experimento de reducción de acetileno. Previamente al experimento, las cepas se cultivaron por 8 días en medio líquido Z-8° sin fuente de nitrógeno, con el fin de promover la actividad de la nitrogenasa. Posteriormente se hicieron cinco tratamientos (Posgate 1972) en duplicado: (1) Z-8° con cianobacteria; (2) Z-8° con cianobacteria y 2 mL de acetileno al 10%; (3) Z-8° con 2 mL de acetileno al 10%; (4) Z-8° con 0.3 mL de etileno al 1.5%, y (5) Z-8° únicamente.

La reducción de acetileno se determinó por medio de un cromatógrafo de gases (Varian 6000, Varian Instrument Group, USA), equipado con un detector de ionización de flama de hidrógeno. Las condiciones de operación incluyeron: malla ID de 0.12 cm, temperatura isoterma 60 °C, nitrógeno e hidrógeno como gases acarreadores, a una tasa de flujo de 30 mL s<sup>-1</sup>, tasa de flujo de aire de 300 mL s<sup>-1</sup>, temperatura del inyector 50 °C, temperatura del detector 200 °C, con una atenuación de 8, velocidad de la gráfica 5 mm min<sup>-1</sup>, sensibilidad de registro 1-mV. Las tasas del detector de ionización de flama utilizadas fueron 10<sup>-12</sup> y 10<sup>-11</sup>. Los datos se registraron cada 4 h a lo largo de 24 h, con el fin de obtener la cinética de fijación para cada morfotipo.

El acetileno reducido se convirtió en nitrógeno fijado utilizando una proporción de 4:1 (Jensen y Cox 1983, Stal 1988, Ortega-Calvo y Stal 1991). De esta manera se calculó la tasa de fijación de nitrógeno para cada intervalo de 4 h.

### 5.3 RESULTADOS

#### 5.3.1 Identificación de los morfotipos

Con base en las observaciones de preparaciones frescas de cortezas naturales (CN) y cepas cultivadas fue posible identificar los morfotipos y la abundancia estimada de cada morfotipo. Los resultados se muestran en el Cuadro 5.1. En las cortezas planas con menor diversidad de cianobacterias se encontraron únicamente *Scytonema* spp., *Microcoleus* cf. *paludosus* y *Phormidium* sp.

CUADRO 5.1. Morfotipos cianobacterianos y su abundancia relativa en cortezas microbióticas de la Sierra de la Laguna

| Designación por<br>Geitler (1932)                        | Abundancia relativa <sup>a</sup> |        |
|--|----------------------------------|--------|
|  | Plana                            | Rugosa |
| <i>Scytonema</i> cf. <i>ocellatum</i> Kützing            | ++++                             | ++++   |
| <i>Scytonema</i> sp.                                     | +++                              | ++     |
| <i>Microcoleus</i> cf. <i>paludosus</i> (Kütz.) Gomont.  | ++++                             | +++    |
| <i>Microcoleus</i> cf. <i>sociatus</i> West & West       | ++                               | ++     |
| <i>Phormidium</i> sp.                                    | +++                              | +++    |
| <i>Nostoc</i> cf. <i>microscopicum</i> Carmich. ex Harv. | +                                | ++     |
| <i>Calothrix</i> cf. <i>marchica</i> Lemmerm.            | -                                | +      |
| <i>Calothrix</i> cf. <i>elenkinii</i> Kossinsk.          | -                                | +      |

<sup>a</sup> - = no detectada; + = presente; ++ = común; +++ = muy común; ++++ = dominante.

De acuerdo con el *Bergey's Manual of Systematic Bacteriology* (Boone y Castenholz 2001), el cual se basa principalmente en las relaciones filogenéticas que existen entre los grupos, los morfotipos cianobacterianos que se reconocieron en las cortezas pertenecen a las Subsecciones III y IV. Las principales características de las cianobacterias de la Subsección III (Castenholz *et al.* 2001), correspondiente al Orden Oscillatoriales del sistema botánico (Elenkin 1934), son organismos filamentosos que se dividen por fisión binaria en un solo plano en ángulos

rectos, produciendo únicamente "células vegetativas", de tal manera que no presentan heterocistos o aquinetos. Las cianobacterias de la Subsección IV (Rippka *et al.* 2001), correspondiente al Orden Nostocales del sistema botánico (Castenholtz 1989 *sensu* Rippka *et al.* 1979), son organismos filamentosos que se dividen exclusivamente por fisión binaria en un solo plano, algunos con la posibilidad de desarrollar "ramificaciones falsas" y que tienen la potencialidad de producir heterocistos en ausencia de nitrógeno combinado.

El sistema de clasificación de Bergey permite la identificación de cada morfotipo sólo a nivel de género, en contraste con el sistema de Geitler (1932), el cual permite identificar hasta el nivel de especie, basándose principalmente en rasgos morfológicos. En el Cuadro 5.2 se presentan las descripciones de los géneros identificados de acuerdo con los sistemas de Bergey, Anagnostidis y Komárek (1988) y Komárek y Anagnostidis (1989) y las descripciones a nivel de especie de Geitler.

A continuación se presenta una breve descripción de cada morfotipo identificado, con base en el sistema morfológico de Geitler (1932).

Cepa SLC1097-3 (Fig. 5.3c). Aislada de una corteza plana e identificada como *Microcoleus cf. paludosus*, es una cianobacteria filamentosas con múltiples tricomas densamente agregadas dentro de la vaina. Los tricomas tienen 6  $\mu\text{m}$  de diámetro, no constreñidos en las uniones; las células son casi tan largas como anchas (5-7  $\mu\text{m}$ ); la célula terminal es más o menos cónica.

CN 1 (Figura 2f), se tomó de una corteza plana. Este morfotipo se identificó como *Microcoleus cf. sociatus*. Esta cianobacteria filamentosas es más delgada que *M. cf. paludosus*. El diámetro celular es de 2.5 a 3.25  $\mu\text{m}$ , con longitud de 6 a 9  $\mu\text{m}$ . Las células se constriñen en las paredes celulares y la célula terminal es cónica y puntiaguda, más de cinco veces más larga que ancha.

Se observaron dos morfotipos del género *Scytonema*. Un rasgo distintivo de este género es la producción de filamentos con doble pseudoramificación primaria, formada por la perforación de la vaina por el tricoma, cada ramificación desarrollando su propia vaina (Fig. 5.3a, d). El heterocisto con doble poro puede observarse (Fig. 5.3b).

CUADRO 5.2. Principales características de los morfotipos presentes en las cortezas microbióticas de la Sierra de la Laguna, B.C.S. en los sistemas de clasificación utilizados para identificarlos

| Bergey's (2001)  | Anagnostidis y Komárek (1988) /<br>Komárek y Anagnostidis (1989)   | Geitler (1932)   |
|--|--|--|
| Género   | Género   | Especie  |
| <p><b>Microcoleus</b><br/>De dos a varios tricomas reunidos dentro de una vaina homogénea común; células de 3-6 <math>\mu\text{m}</math> de diámetro, más largas que anchas; células terminales maduras cónicas; movimiento vibratorio sin rotación.</p> | <p><b>Microcoleus</b><br/>Vainas finas, difluentes, homogéneas; talo fino en estratos delgados.</p>  | <p><b>Microcoleus sociatus</b><br/>Filamentos largos, no ramificados; de 9-13 tricomas en cada vaina; tricomas constreñidos en las paredes transversales, de 2.7-3 <math>\mu\text{m}</math> de ancho; célula terminal cónica y puntiaguda, más de 5 veces más larga que ancha.<br/><b>M. paludosus</b><br/>Tricomas individuales o varios en cada vaina; célula terminal no capitada, cónica; células casi tan largas como, o dos veces tan largas como anchas, de 5-7 <math>\mu\text{m}</math> de ancho, no granuladas.</p> |
| <p><b>Leptolyngbya</b><br/>Tricomas cilíndricos menores de 3 <math>\mu\text{m}</math> de diámetro; células más largas que anchas; constricciones poco profundas entre las células; célula apical redondeada.</p>   | <p><b>Leptolyngbya</b><br/>Tricomas cilíndricos de 0.5 a 2 (-3) <math>\mu\text{m}</math> de diámetro, más o menos curvados; constricciones en las paredes transversales más o menos indistintas, pero principalmente presentes; vainas finas pero distintivas, que se desarrollan más o menos facultativamente dependiendo de las condiciones ambientales; tricomas que se desintegran en sus partes terminales, formando hormogonios móviles.</p> | <p><b>Phormidium sp.</b><br/>Tricomas cilíndricos, de 1.9 <math>\mu\text{m}</math> de ancho, individuales dentro de una vaina; el extremo de la vaina siempre abierto; tricomas constreñidos en las uniones; los ápices frecuentemente atenuados, rectos.</p>  |
| <p><b>Nostoc</b><br/>Filamentos con heterocistos; ciclo de desarrollo en el que se producen hormogonios.</p>   | <p><b>Nostoc</b><br/>Estadios iniciales con tricomas envueltos por vainas esféricas mucilaginosas, a veces con heterocistos polares; liberación y reproducción especial de hormogonios móviles. Sus colonias varían desde pequeños tapetes que cubren plantas acuáticas y estratos sumergidos hasta esferas mucilaginosas o masas que alcanzan varios cm de diámetro.</p>  | <p><b>Nostoc microscopicum</b><br/>Colonia esférica o elipsoidal, de hasta 1 cm de largo. Tricomas sin vaina firme, de 5-8 <math>\mu\text{m}</math> de ancho; heterocistos intercalares casi esféricos; células terminales no alargadas.</p>   |
| <p><b>Scytonema</b><br/>Filamentos con heterocistos; falsa ramificación, individual o geminada; no se producen aquinetos.</p>  | <p><b>Scytonema</b><br/>Además de los rasgos de falsa ramificación, las células apicales son redondeadas, a veces con células terminales más o menos esféricas y vacuoladas.</p>   | <p><b>Scytonema sp.</b><br/>Doble pseudo-ramificación, formada por la perforación de la vaina por el tricoma; vainas laminadas y homogéneas; filamentos de 8.5-10 <math>\mu\text{m}</math> de ancho; en agua dulce o suelo.<br/><b>S. ocellatum</b><br/>Además de los rasgos generales, los filamentos tienen 10-18 <math>\mu\text{m}</math> de ancho.</p>   |
| <p><b>Calotrix</b><br/>Los tricomas maduros envainados exhiben un grado pronunciado de estrechamiento; heterocisto basal, con un sólo poro.</p>  | <p><b>Calotrix</b><br/>Tricomas solitarios o agrupados. Vainas delgadas, firmes, ligeramente lameladas en el extremo, a veces ensanchadas. Desarrollo facultativo de aquinetos.</p>  | <p><b>Calothrix elenkinii</b><br/>Filamentos de 80-250 <math>\mu\text{m}</math> de largo, unidos en penachos, torcidos en la base; de 6-9 <math>\mu\text{m}</math> de ancho en la base y de 4.5-6 <math>\mu\text{m}</math> en el medio.<br/><b>C. marchica</b><br/>Filamentos no tan hinchados en la base; células casi tan largas como anchas o más cortas que anchas; tricoma de 4-4.5 <math>\mu\text{m}</math> de ancho.</p>  |

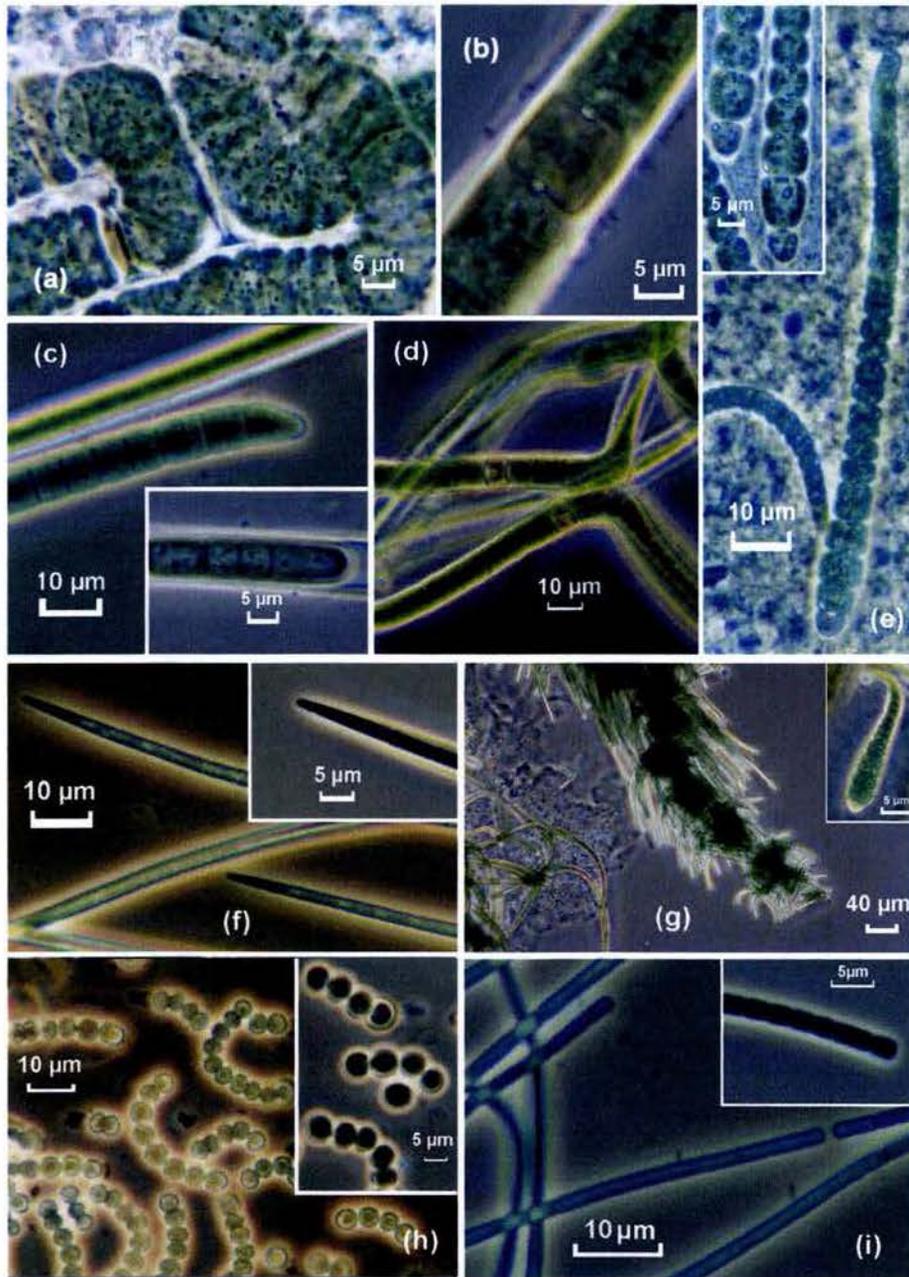


FIGURA 5.3. Micrografías de los morfotipos presentes en las cortezas microbióticas estudiadas. (a) *Scytonema* cf. *ocellatum*; (b) heterocisto de *Scytonema* con doble poro; (c) *Microcoleus* cf. *paludosus*; (d) *Scytonema* sp. (e) *Calothrix* cf. *marchica*; (f) *Microcoleus* cf. *sociatus*; (g) *Calothrix* cf. *elenkinii*; (h) *Nostoc* cf. *microscopicum*; (i) *Phormidium* sp.

Cepa SLC1097-8 (Fig. 5.3a). Se aisló de una corteza rugosa y se identificó como *Scytonema cf. ocellatum*, una cianobacteria filamentosa con filamentos de 15 a 18  $\mu\text{m}$  de diámetro.

CN 2 (Fig. 5.3d) se tomó de una corteza plana y se identificó como *Scytonema* sp. La principal diferencia con *S. cf. ocellatum* fue el diámetro más delgado del filamento, el cual tiene de 8.5 a 10  $\mu\text{m}$ .

CN 3 (Fig. 5.3h) se tomó de una corteza rugosa y se identificó como *Nostoc cf. microscopicum*, cianobacteria filamentosa con células esféricas que forman una colonia suave, redonda y gelatinosa <5 mm, de superficie exterior firme. Los heterocistos son intercalares, tienen 7.0  $\mu\text{m}$  de diámetro, los tricomas 5.0 a 5.5  $\mu\text{m}$  de diámetro y los filamentos 7.7 a 8.0  $\mu\text{m}$  de diámetro.

Se encontraron dos morfotipos del género *Calothrix*. Los rasgos distintivos de este género son estructura filamentosa, un heterocisto basal, filamentos que se estrechan de la base al ápice y talo con apariencia de penachos penicilados.

CN 4 (Fig. 5.3e) se tomó de una corteza rugosa y se identificó como *Calothrix cf. marchica*. El diámetro basal del filamento es de 8 a 10  $\mu\text{m}$ , el diámetro medio 6 a 7  $\mu\text{m}$ ; los tricomas tienen 100 a 200  $\mu\text{m}$  de longitud, y se encuentran aislados o en pequeñas agregaciones.

Cepa SLC1097-9 (Fig. 5.3g) se aisló de una corteza rugosa. Este morfotipo se identificó como *Calothrix cf. elenkinii*. Los filamentos, distintivamente hinchados en la base, tienen de 55 a 88  $\mu\text{m}$  de longitud y se encuentran libres o unidos en penachos; el tricoma tiene un diámetro basal de 6 a 11  $\mu\text{m}$  y de 4.5  $\mu\text{m}$  en la parte media.

Cepa SLC1097-4 (Fig. 5.3i) se aisló de una corteza plana y se identificó como *Phormidium* sp. Esta es una cianobacteria filamentosa con tricomas cilíndricos constreñidos en las uniones e individuales dentro de una vaina mucilaginosa prominente. El diámetro del tricoma es de 1.9  $\mu\text{m}$  y el del filamento de 3.8  $\mu\text{m}$ ; los ápices del tricoma son rectos.

La diversidad de morfotipos de cianobacterias fue mayor en las cortezas rugosas que en las planas. Las colonias de *Nostoc cf. microscopicum* fueron frecuentes en las cortezas rugosas, en tanto que muy pocas se observaron en las muestras de cortezas planas. *Calothrix cf. elenkinii* y *C. cf. marchica* se encontraron únicamente en las cortezas rugosas. Además de tener una mayor diversidad de morfotipos cianobacterianos, las cortezas rugosas también presentaban líquenes y musgos, los cuales eran los responsables de esta apariencia. Los líquenes y musgos no se

encontraron en las cortezas planas, en las que *Scytonema* spp. y *Microcoleus* spp. fueron los principales morfotipos. En ambos tipos de cortezas, los talos de *Scytonema* siempre permanecieron en la superficie, aún en condiciones de sequía (Fig. 5.4a, b), en tanto que el talo de *Microcoleus* aparecía algunas horas después de la reactivación (Fig. 5.4d). *Microcoleus* fue la causa de un efecto de reverdecimiento ("greening") que se presentaba en las cortezas planas después del humedecimiento (Fig. 5.4f), en tanto que en las cortezas rugosas este efecto era también causado por los líquenes (Fig. 5.4c, e).

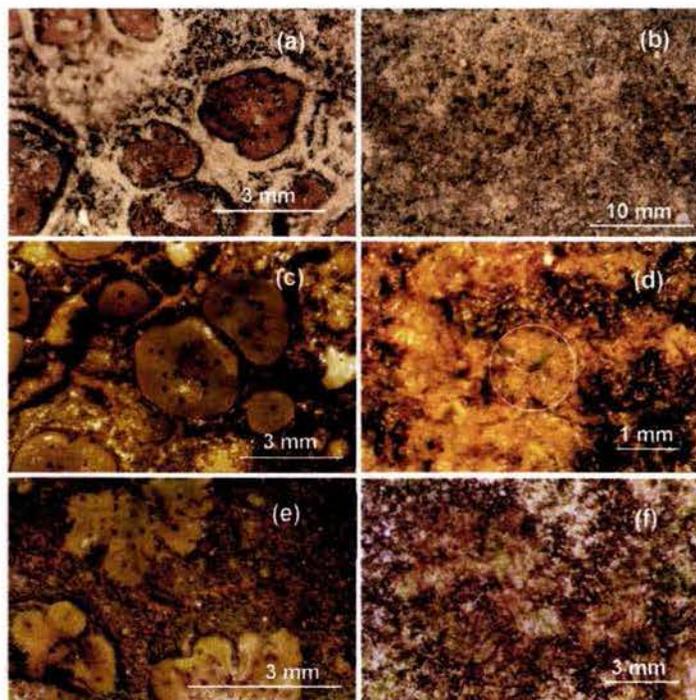


FIGURA 5.4. Micrografías estereoscópicas de cortezas microbióticas naturales secas y reactivadas. (a) corteza rugosa seca; (b) corteza plana seca; (c) corteza rugosa con 20 h de reactivación; (d) corteza plana con 20 h de reactivación. El círculo muestra a *Microcoleus* emergiendo de una capa subyacente; (e) corteza rugosa con 47 h de reactivación; (f) corteza plana con 71 h de reactivación.

La presencia de heterocistos en *Scytonema* y *Calothrix*, en contraste con otros morfotipos tales como *Microcoleus* y *Phormidium*, sugirieron la habilidad de los dos primeros como fijadores de nitrógeno.

Algunos morfotipos, tales como *Microcoleus* cf. *sociatus*, *Nostoc* sp. y *Calothrix* cf. *marchica* se observaron únicamente en preparaciones frescas obtenidas de cortezas naturales. Estos no pudieron manipularse, de tal manera que no fue posible cultivarlos. Por esta razón, el

experimento de fijación de nitrógeno se llevó a cabo sólo en cuatro morfotipos: *Microcoleus* cf. *paludosus*, *Phormidium* sp., *Scytonema* cf. *ocellatum* y *Calothrix* cf. *elenkini*. Las cepas de estos cuatro morfotipos se encuentran en la Colección de Cianobacterias del CIBNOR, en el Laboratorio de Ecología y Biotecnología Microbiana.

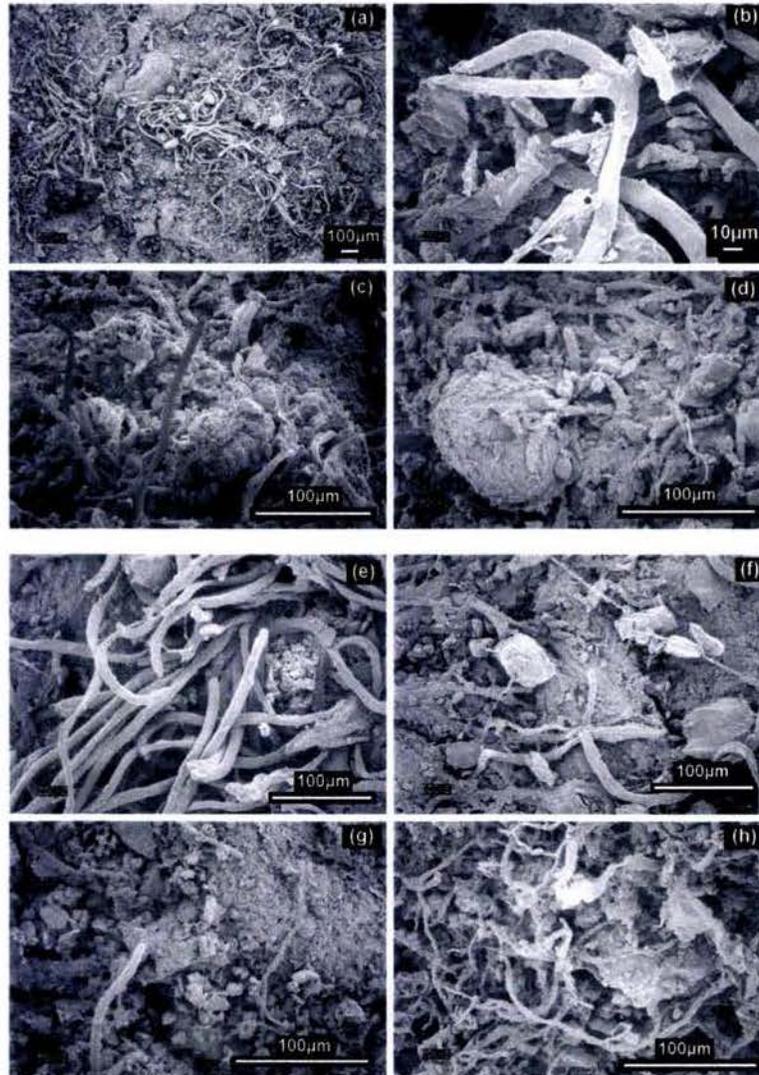


FIGURA 5.5. Micrografías de microscopía electrónica de barrido de cortezas naturales secas y reactivadas. (a) corteza plana seca; (b) filamento pseudoramificado de *Scytonema*; (c) filamentos de *Microcoleus* cf. *paludosus* emergiendo desde una capa más profunda; (d) partículas de suelo unidas por la actividad cianobacteriana; (e) filamentos de *Scytonema* en una corteza rugosa seca; (f) detalle de partículas de suelo atrapadas; (g) filamento de *Microcoleus*; (h) red de vainas sobre la superficie del suelo.

### 5.3.2 Microscopía electrónica de barrido

Puede observarse la prevalencia de *Scytonema* en la superficie de las cortezas planas secas (Fig. 5.5a), que se identifica por sus típicos filamentos con doble pseudoramificación (Fig. 5.5b). En las cortezas húmedas se ven los filamentos de *Microcoleus* cf. *paludosus* emergiendo desde capas más profundas (Figura 5.5c), así como partículas de suelo atrapadas por la mucosidad producida por la actividad cianobacteriana (Fig. 5.5d).

Las cortezas rugosas secas también muestran la dominancia de *Scytonema* (Fig. 5.5e). Las mismas cortezas secas muestran partículas de suelo que parecerían estar atadas por secreciones mucilaginosas de los componentes microbianos (Fig. 5.5f). En las cortezas rugosas reactivadas se ven filamentos de *Microcoleus* cf. *paludosus* emergiendo (Fig. 5.5g). La Fig. 5.5h muestra la intrincada malla formada por vainas durante la actividad cianobacteriana.

La Fig. 5.6 muestra la cinética de reducción de acetileno obtenida para estos dos morfotipos en mmoles de etileno producido por mg de biomasa, en donde se puede observar que *Calothrix* redujo más eficientemente el acetileno. El Cuadro 5.3 muestra la producción de nitrógeno estimada para cada morfotipo, expresada en mg de N<sub>2</sub> por mg de biomasa. De acuerdo con esta estimación, *Calothrix* fijaría casi cinco veces más nitrógeno por hora que *Scytonema*.

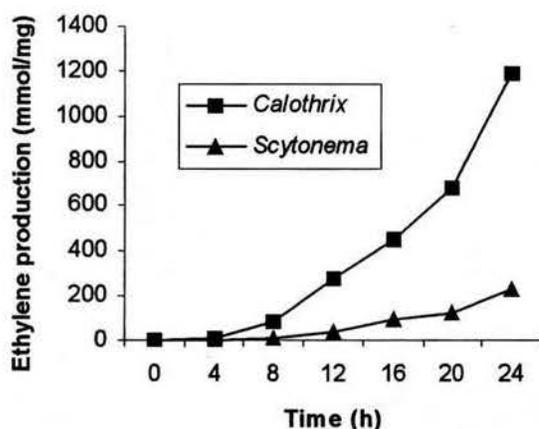


FIGURA 5.6. Patrón de reducción de acetileno en mmol de etileno producido por mg de biomasa obtenido para los dos morfotipos que fueron capaces de reducir acetileno en etileno.

### 5.3.3 Fijación de nitrógeno

El experimento de reducción de acetileno de los cuatro morfotipos cianobacterianos demostró que *Scytonema* y *Calothrix* eran capaces de reducir acetileno a etileno, en tanto que *Microcoleus* y *Phormidium* no tuvieron la capacidad de hacerlo. Esto sugiere que sólo las cianobacterias filamentosas *Scytonema* y *Calothrix*, formadoras de heterocistos, son fijadoras de nitrógeno.

## 5.4 DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

### 5.4.1 Composición cianobacteriana de las cortezas

La identificación de las cianobacterias, en la que se emplearon los sistemas de clasificación de Bergey, de Anagnostidis y Komárek / Komárek y Anagnostidis y de Geitler, tuvo por resultado asignaciones taxonómicas diferentes para algunos de nuestros morfotipos. Un ejemplo es que la cianobacteria delgada y filamentosa reportada por Geitler como *Phormidium* tiene en el sistema de Anagnostidis y Komárek (1988) características del género novo descrito por ellos *Leptolyngbya*, y se reconoce como tal en el sistema de Bergey. Geitler discutía que el arreglo del género *Phormidium* era indudablemente artificial porque se refería a rasgos tales como la constricción en las paredes celulares. Anagnostidis y Komárek (1988) erigieron el nuevo género *Leptolyngbya* incluyendo un grupo de definición problemática y diversa, anteriormente determinado como especies de *Oscillatoria*, *Lyngbya*, *Phormidium* y *Plectonema*. En el *Bergey's Manual*, Castenholz *et al.* (2001) afirman que, aún cuando la filogenia de la Subsección III (a la cual pertenecen *Microcoleus* y *Leptolyngbya*) no ha sido completamente realizada, la información disponible sugiere ya que esta sección no es filogenéticamente coherente. Comparaciones de secuencias del 16S rRNA de cianobacterias, que complementan los sistemas que se basan principalmente en rasgos morfológicos, han mejorado su taxonomía, reconociéndose problemas en géneros que no presentan agrupaciones coherentes, como en el caso de *Phormidium*.

Otro ejemplo es que el sistema de Geitler considera a *Tolypothrix* y a *Scytonema* como géneros diferentes, siendo la principal diferencia morfológica el número de pseudo-ramificaciones, una en el primero y dos en el segundo. Sin embargo, debido a la forma en la que se desarrollan tales pseudo-ramificaciones, el mismo Geitler discutía ya la dificultad para diferenciar estos dos grupos. En el *Bergey's Manual*, *Tolypothrix* se incluye en el género *Scytonema*. En contraste con

la Subsección III, todos los miembros con heterocistos de la Subsección IV forman un grupo genéticamente coherente.

Los morfotipos cianobacterianos dominantes en las cortezas de la Sierra de la Laguna no fueron los que se han citado como más comunes para otras regiones áridas de Norteamérica, como son *Microcoleus vaginatus* (García-Pichel y Belnap 1996) y *Nostoc commune* (Johansen 1993, Evans y Johansen 1999). No fue posible encontrar ninguna de estas especies, empleando sistemáticamente métodos morfológicos. Para Geitler, la principal diferencia entre *M. vaginatus* y *M. paludosus* es la célula terminal caliptrada de la primera, en tanto que para *Nostoc commune* y *N. microscopicum* la principal diferencia está en el tamaño de la colonia.

CUADRO 5.3. Reducción total de acetileno durante un ciclo de 24 h y tasa calculada de fijación de nitrógeno

| Morfotipo con heterocistos | Reducción de acetileno [mmol C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> (mg biomasa) <sup>-1</sup> (24h <sup>-1</sup> )] ± sd | Fijación de nitrógeno [mg de nitrógeno fijado (g biomasa) <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup> ± sd |
|----------------------------|--|--|
| <i>Calothrix</i>           | 1185.148 ± 114   | 0.449 ± 0.13   |
| <i>Scytonema</i>           | 228.334 ± 37   | 0.083 ± 0.02   |

En un estudio realizado en muestras provenientes del Desierto Sonorense en Arizona, Cameron (1960) estableció que *Microcoleus vaginatus* era menos prevalente en las cortezas microbióticas de desiertos cálidos. Cameron encontró que en esas cortezas dominaba el género *Schizothrix*. Tales diferencias, sumadas al aislamiento de la península, sugieren que los morfotipos cianobacterianos del presente estudio hayan sido capaces de prosperar gracias a que están mejor adaptados a las condiciones particulares del área. La composición cianobacteriana de las cortezas de la Sierra de la Laguna puede explicarse por las condiciones climáticas transicionales del área de estudio y la particular historia geológica de la Península de Baja California. Un estudio de muestras provenientes de las cercanas llanuras del Desierto Sonorense al norte serviría para apoyar esta hipótesis.

#### 5.4.2 Erosión

El microscopio electrónico de barrido nos permitió hacer observaciones detalladas, tales como partículas de suelo que parecerían estar atadas por la antigua red mucilaginoso remanente del último periodo de actividad (Fig. 5.5f), adicionalmente a la red conformada por los filamentos

(Fig. 5.5h) durante la actividad. Esto sugiere que los polisacáridos producidos durante los cortos periodos de activación (que se limitan a tres meses como máximo en el área de estudio) son capaces de retener partículas de suelo aún en condiciones de sequía, contribuyendo a la agregación y estabilidad del sedimento.

Los resultados de este estudio apoyan la hipótesis expresada por Johansen (1993) de que probablemente el papel más importante de las cortezas microbióticas sea la estabilización de la superficie del suelo y la consecuente reducción de la erosión. También sugieren que este proceso de construcción es más importante en el área de estudio que los procesos destructivos con que se ha relacionado a las cortezas microbióticas, tales como el escurrimiento inicial causado por la hidrofobicidad del suelo y el taponamiento de los poros (Kidron *et al.* 1999). En los suelos erosionados, en donde la pérdida de partículas es más rápida que la formación de suelo, la estabilidad del suelo relacionada con las cortezas microbióticas contribuiría a aumentar la posibilidad de germinación y reclutamiento de plántulas de plantas superiores, constituyendo un importante eslabón en la dinámica entre los procesos de destrucción y formación del suelo.

#### 5.4.3 Fijación de nitrógeno

Los resultados obtenidos del experimento de fijación de nitrógeno apoyan nuestra creencia de que la capacidad para realizar este proceso metabólico se limita a los morfotipos cianobacterianos con células diferenciadas, tales como los heterocistos, que pueden realizar eficientemente la fijación de nitrógeno. Esto sugiere que el crecimiento de morfotipos sin heterocistos, como *Microcoleus* y *Phormidium* dependen de la presencia de aquéllos que tienen la capacidad de fijar nitrógeno y explicaría la emergencia retardada de los filamentos de *Microcoleus* después de la reactivación, si ésta se relaciona con la actividad de los fijadores de nitrógeno.

Con base en la cinética de la reducción de acetileno que se muestra en la Fig. 5.6, *Calothrix* parece fijar nitrógeno en forma más eficiente que *Scytonema*. Sin embargo, en las cortezas de la Sierra de la Laguna *Scytonema* representaría el principal proveedor de nitrógeno en términos de biomasa porque, como se muestra en el Cuadro 5.1, además de encontrarse en ambos tipos de cortezas está mejor representada que *Calothrix* aún en las cortezas en las que ambos morfotipos coexisten.

El propósito de este estudio era determinar la capacidad como fijadores de nitrógeno de los morfotipos estudiados y comparar la eficiencia entre ellos. Los resultados fueron lo

suficientemente buenos para alcanzar el objetivo planteado, aunque no lo suficiente para hacerlos comparativos con otros estudios de actividad de la nitrogenasa basados en ARA. Los diseños experimentales son tan variados de un estudio a otro que no fue posible hacer una comparación. Estudios futuros brindarán la posibilidad de hacer la comparación con otros resultados.

La presencia de morfotipos confirmados como fijadores de nitrógeno en las cortezas sugieren su actuación como biomejoradores de suelos empobrecidos y erosionados. Sin embargo, el estudio de Harper y Marble (1988) indica que el balance de la fijación de nitrógeno tras la actividad de las bacterias desnitrificadoras en la misma corteza no sería suficiente para sostener plantas superiores. Nosotros pensamos que la presencia de fijadores de nitrógeno eficientes contribuye, al menos, a crear las condiciones adecuadas para el desarrollo y permanencia de diferentes poblaciones bacterianas y aún de musgos y líquenes, lo que resulta en la estructura más compleja de las cortezas rugosas.

En este sentido, la presencia de por lo menos dos tipos de estructuras, plana y rugosa, apoya la hipótesis de un proceso de sucesión tendiente hacia un clímax (Campbell *et al.* 1989, Belnap y Lange 2001, Yeager *et al.* 2004), que se definiría por la presencia de asociaciones cada vez más complejas de microorganismos, incluyendo diversas especies de líquenes y musgos que son los grupos que les confieren, precisamente, el aspecto rugoso.

La coexistencia de cortezas de composición simple (planas) y de composición más compleja (rugosas), así como la observación de cúmulos “degradados” en los que las cortezas habían sido sepultadas por sedimentos provenientes de la parte alta de la ladera, sugieren que la erosión, al menos en El Crucero, se ha desarrollado en varios ciclos, en los que los sedimentos pudieron alcanzar algún grado de estabilidad previo a la continuación del proceso.

Los resultados de los análisis y los experimentos desarrollados sugieren que las cortezas microbióticas de la Sierra de la Laguna contribuyen como mejoradores de la calidad del suelo, debido sobre todo al grupo de las cianobacterias, las cuales actúan activamente como estabilizadoras de sedimentos y algunos de sus morfotipos, particularmente las que tienen heterocistos, como fijadoras de nitrógeno.

También pudo comprobarse que el aspecto de las cortezas está estrechamente relacionado con la diversidad de especies de microorganismos que la conforman.

El hecho de haber podido lograr el aislamiento y cultivo de algunos morfotipos de cianobacterias fijadoras de nitrógeno nos brinda la oportunidad de comprobar su eficiencia en

condiciones silvestres en el futuro, abriendo nuevas líneas de investigación, las cuales se abordarán en el siguiente capítulo.

## 6. DISCUSION GENERAL

### 6.1 DIAGNÓSTICO DE LA SIERRA DE LA LAGUNA - IMPACTO ANTROPOGÉNICO

En la Fig. 6.1 se muestra un diagrama de los pasos que se siguieron para obtener el inventario del área afectada por la erosión y para hacer el análisis temporal. Los resultados señalan a la Sierra de la Laguna como un sistema montañoso que, a pesar de contar con muy pocos asentamientos humanos, ya presenta superficies importantes afectadas por la erosión, así como que ésta se ha incrementado recientemente, sobre todo en la región norte de la sierra.

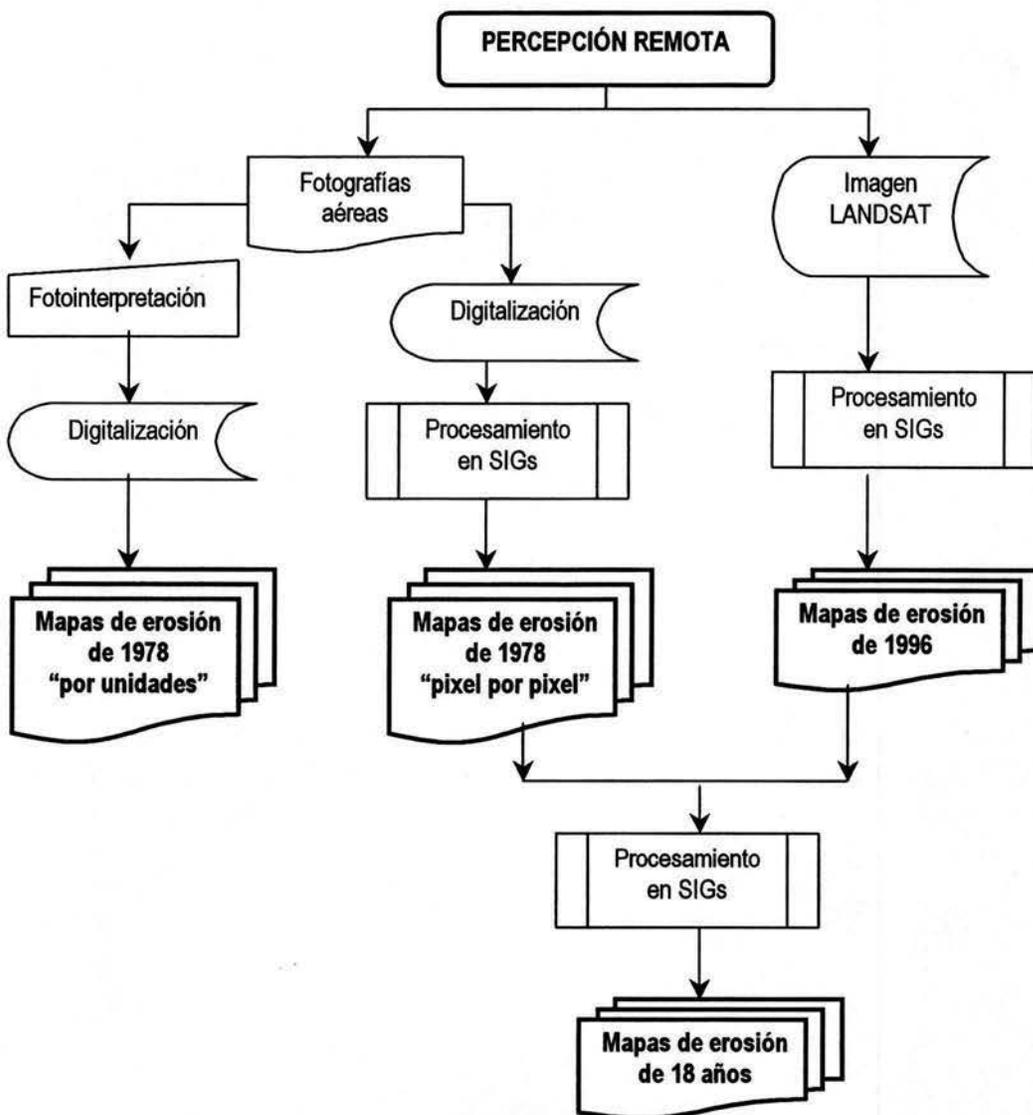


Fig. 6.1. Diagrama de la generación de los mapas de erosión.

Se encontró también que la distribución espacial de las áreas erosionadas no tiene una correspondencia con lo esperado por el tipo de suelo, la longitud e inclinación de las pendientes o la cobertura vegetal, sino que está asociada con las actividades productivas, principalmente con el desarrollo de infraestructura, en este caso para la ganadería extensiva, como la construcción de caminos y de ranchos.

Varios autores han definido la desertificación como una serie de cambios sucesivos que afectan la productividad de los ecosistemas áridos, semiáridos y subhúmedos (Glantz y Orlovsky 1983). Sin embargo, actualmente se acepta que la degradación de la tierra afecta ecosistemas ubicados lejos de los desiertos climáticos (Dregne 1986). El hecho de que el fenómeno se haga más evidente en los ecosistemas áridos se debe a que las condiciones climáticas extremas que son características de éstos hacen más difícil la recuperación de la cubierta vegetal. Es por esto que el manejo inadecuado de la tierra durante las temporadas en las que hay poca precipitación, alta evaporación, altos índices de radiación, etc., producen la degradación relativamente rápida del ecosistema (Aubreville 1949, Glantz y Orlovsky 1983, Dregne 1986).

Los resultados obtenidos en este trabajo para el área de San Antonio de la Sierra parecen confirmar esta tendencia. Aunque los 18 años que transcurrieron entre la toma de las fotografías aéreas de 1978 y la de la imagen LANDSAT de 1996 representan un periodo relativamente corto, en la parte norte de la sierra la suma de las actividades antrópicas con la tendencia hacia mayor aridez ha causado un deterioro considerable. El incremento superior al 100 % de la superficie erosionada que ocurrió en esta localidad durante el periodo analizado se explica por la presión de pastoreo por ganado bovino, sumado a la mayor densidad de ranchos de las tres áreas analizadas, pero sobre todo a un proceso de desertización a largo plazo.

Por el contrario, en el análisis del mismo periodo, el área de estudio que resultó menos afectada fue la Cañada de Los Naranjos, que se ubica en la región sur del macizo montañoso. Esta región recibe más eficientemente la influencia de los huracanes y las lluvias estivales y, por lo tanto, es la más húmeda de las tres áreas. La mayor humedad en esta región, el poco ganado bovino en la localidad, la baja densidad de los ranchos y una red de caminos medianamente compleja ubicada en geoformas de acumulación, podría ser la causa de que la cubierta vegetal se haya eliminado más lentamente que en las otras dos localidades, resultando en el incremento más bajo de la superficie erosionada (13.7 %) durante el periodo analizado.

El experimento de exclusión que se hizo en parcelas experimentales, aún a un nivel local, demostró que el pastoreo afecta directa e indirectamente las propiedades físicas y químicas del suelo. Sin ser tan agresivo o definitivo como el desmonte que se realiza para la construcción de un rancho o la apertura de un camino, el deterioro causado por la presión constante del pastoreo y el paso del ganado debe magnificarse a través del tiempo. Esta podría ser la causa del tipo de erosión laminar en parches que se encontró en los tres sitios (Figura 3.9). Este tipo de erosión, representado por múltiples microáreas de uno o pocos píxeles, fue más abundante en el área de San Antonio de la Sierra (Figura 3.7) la cual, como se señaló al principio, se consideró como representante de ganado bovino.

## 6.2 EL MODELO DE LA ECUACIÓN UNIVERSAL DE PÉRDIDA DE SUELO.

Generados a partir de datos obtenidos en parcelas experimentales y con la ayuda de la informática, el uso de modelos predictivos se ha vuelto una de las herramientas más utilizadas en el análisis de la erosión. Sin embargo, un problema que se presenta al utilizarlos es que todos ellos extrapolan sus resultados al total del área de estudio, asumiendo que el fenómeno observado es independiente del espacio en un sitio dado. Esto conduce al error de asumir que la relación fenómeno-medio ambiente no varía en espacio y tiempo, que las variables que se han incluido en el modelo son las importantes y que las demás tendrían un efecto neutral en el fenómeno (Corsi *et al.* 2000). Al utilizar ecuaciones puntuales que no toman en cuenta la complejidad del sistema, por ejemplo, la de las características de las superficies sobre las que ocurre el escurrimiento, los modelos conllevan a un déficit en la información requerida (Summer *et al.* 1998).

La Ecuación Universal de Pérdida de Suelo ha sido, desde que Weischmeier y Smith la dieron a conocer en 1978, el modelo más popular que se utiliza a nivel mundial para predecir la pérdida de suelo. El modelo tiene muchas limitantes, entre ellas el no contemplar las tasas de sedimentación, o la forma en la que se estiman los valores de los factores para incorporarlos al modelo o incluso que se considera que no puede predecir con seguridad pérdidas de suelo en aplicaciones no agrícolas (Risse *et al.* 1993).

Entre las ventajas que presenta su uso están el que sea un modelo relativamente simple, de aplicación relativamente sencilla y que requiere poco tiempo y recursos económicos para generar la información que utiliza. Al integrar este modelo con un SIG se facilita la manipulación de los datos y los resultados se obtienen rápidamente y en forma gráfica. Otra gran ventaja de

utilizar el USLE con un SIG es la posibilidad de predecir la erosión potencial en grandes áreas gracias a la capacidad de extrapolación, de tal manera que se pueden utilizar datos relativamente puntuales para generar información a otras escalas. Finalmente, la combinación del USLE con un SIG permite que el modelo pueda ser aplicado a nivel de pixel, es decir, de microáreas, lo que permitiría identificar fácilmente zonas problemáticas específicas.

Uno de los factores más difíciles de ser calculado es el de la erodabilidad. En el caso del presente trabajo, el hecho de contar con información sobre los parámetros físico-químicos de los suelos de la región de estudio que son necesarios para obtener el valor de K con el nomograma de Wischmeier *et al.* (1971), contribuyó a hacer más acotable la ecuación. De igual manera, contar con información de campo fue muy valioso para calcular el valor de cobertura (factor C), ya fuera por los registros del porcentaje de follaje que retenían las especies dominantes de la comunidad o por la cobertura proporcionada por el mantillo.

De acuerdo con Risse *et al.* (1993), el factor longitud e inclinación de la pendiente (LS) es uno de los que más influencia tiene sobre la eficiencia del modelo. En este estudio se tomó ventaja de contar con un modelo digital de elevación de toda la región generado a partir de curvas de nivel de 20 m, además de contar con el programa USLE2D (Desmet y Govers 1996), que hicieron posible el cálculo de este factor en un paisaje tan complejo como la Sierra de la Laguna.

Si bien es cierto que el modelo USLE tiene muchos inconvenientes, los resultados obtenidos de su aplicación en este estudio, a partir de información obtenida en campo y laboratorio, brindaron información valiosa y suficiente para alcanzar los objetivos planteados. Sería deseable que en el futuro se pudiera aplicar un modelo más adecuado a las condiciones regionales que contemplara, por ejemplo, el impacto que tienen actividades productivas como la ganadería extensiva y el impacto derivado de las características específicas del tipo de ganado.

### 6.3. LA CARTOGRAFÍA ANALÓGICA VS. EL ASPECTO PRÁCTICO DE SU INCORPORACIÓN EN LAS NUEVAS HERRAMIENTAS DE ANÁLISIS ESPACIAL

Paul Theroux, escritor contemporáneo, definió la cartografía como la más artística de las ciencias y la más científica de las artes. Él se refería, desde luego, a la cartografía analógica, en la que la frontera entre la ciencia y el arte muchas veces es difícil de distinguir, ya que debe cumplir con estrictas reglas para hacer legible la información que se representa (tamaño mínimo

cartografiable, grosor de líneas, simbología, colores), además de hacerla agradable a la vista. En este aspecto, las opciones son ilimitadas.

Sin embargo, las nuevas herramientas informáticas han abierto la posibilidad de generar cartografía temática digital a partir del uso cada vez más generalizado de la información numérica obtenida, sobre todo, por captadores satelitales. Esta cartografía permite la clasificación de píxeles en forma individual, con dimensiones que varían dependiendo de la fuente. Esto ofrece la ventaja de poder clasificar superficies de terreno relativamente pequeñas (microáreas) sin las restricciones de la cartografía analógica, en la que el tamaño mínimo cartografiable, generalmente aceptado de 0.5 cm<sup>2</sup>, obliga en ocasiones a englobar más de una clase en la unidad cartografiada.

En este sentido, el principal problema que se hizo evidente durante el análisis temporal del fenómeno fue el tratar de hacer comparable la información obtenida por fotointerpretación con la generada por la clasificación de la imagen satelital. El problema pudo ser superado en esta ocasión realizando una clasificación de las fotografías pancromáticas en formato raster, con una resolución semejante a la de la imagen de satélite.

Muy frecuentemente la única fuente de información temática con la que se cuenta es cartografía en formato analógico, con los inconvenientes de generalización que ya se han mencionado. Es muy importante tomar en cuenta la disparidad de las fuentes originales cuando se trata de hacer comparable la información, sobre todo en estudios temporales, que conducen a una sobre o sub-evaluación de los recursos en el pasado. Un ejemplo claro podría ser la extensión de cobertura por diversos tipos de vegetación, específicamente por el cambio de uso del suelo, que puede resultar en tasas de deforestación excesivas.

La cartografía temática analógica es una fuente de información muy valiosa, que debe ser rescatada para poder utilizarse con las herramientas de análisis espacial cada vez más poderosas. Es un hecho que la información de campo que se pudiera recabar en la actualidad, sobre todo en ciertas localidades, sobre temas como el uso del suelo y la vegetación, sería muy diferente a la que sirvió para elaborar la cartografía de hace treinta años. La cartografía temática analógica de INEGI podría utilizarse como una especie de bitácora de campo al hacerse una clasificación supervisada de imágenes satelitales LANDSAT de fechas equiparables a las de la elaboración de la cartografía.

En las claves de la antigua cartografía temática de INEGI, que se hacía a partir de fotointerpretación, generalmente se incluían asociaciones de clases debido a que el tamaño

mínimo cartografiable hacía imposible generar una cartografía excesivamente detallada para la escala a la que se estuviera realizando el mapa. Generalmente se asignaba como primer miembro de la clave cartográfica a la clase relativamente dominante.

Esta información podría servir para asignar un porcentaje relativo con la realidad del terreno a cada uno de los miembros de la clave, al aplicar un clasificador basado, por ejemplo, en el Teorema de Bayes. Como ya se mencionó, este tipo de clasificadores se basan en el conocimiento previo que se tiene sobre un evento dado. El conocimiento de los expertos que en el pasado elaboraron la cartografía analógica de INEGI podría rescatarse de una manera bastante objetiva, para lograr que esta información pudiera ser utilizada sin producir sesgos al integrarse en el uso de las herramientas modernas de análisis espacial. Con base en la experiencia de 10 años como fotointérprete en la elaboración de la Carta Edafológica a escalas 1:50,000 y 1:250,000, yo propondría, en particular para este tema, 60 / 40 % en una clasificación de dos miembros, y 50 / 30 / 20 % en una clave triple.

#### 6.4 LAS CIANOBACTERIAS COMO ELEMENTOS BIOLÓGICOS MEJORADORES DEL SUELO

Uno de los objetivos de este trabajo fue detectar las posibilidades que las cianobacterias nativas de las cortezas microbióticas del área El Crucero de la Sierra de la Laguna ofrecían como mejoradores del suelo. Aunque el estudio se limitó a la descripción de la naturaleza biológica microbiana de la superficie de los suelos erosionados, incluyendo el estudio de la estructura de las cortezas, de los morfotipos y de la actividad de la nitrogenasa en dos cultivos, se demostró que las redes que forman los filamentos aglutinan las partículas del suelo, que algunos morfotipos son eficientes fijadores de nitrógeno, además de que la complejidad en la estructura de las cortezas rugosas las señala como funcionalmente "maduras". Esto significa que la comunidad bacteriana podría fijar nitrógeno en cantidad suficiente para mejorar los suelos empobrecidos por la degradación (Yeager *et al.* 2004).

Por otra parte, los resultados de López-Cortés *et al.* (2001) y López-Cortés y Maya (2003) han demostrado que es posible producir exitosamente el morfotipo *Scytonema ocellatum* a nivel masivo. Más importante aún es que sus resultados sugieren que el nitrógeno fijado por este microorganismo podría ser utilizado por las plantas superiores. El desarrollo de esta línea de investigación en biotecnología ha permitido vislumbrar como una realidad la aplicación de

cianobacterias con fines de mejoramiento de las características físicas y químicas de suelos empobrecidos.

Entre otras líneas de investigación que sería deseable explorar en este campo se proponen: 1) investigar por qué sólo en la localidad de El Crucero las cortezas se han establecido en superficies amplias y continuas, a diferencia del resto de la Sierra, en donde no se presentan, son escasas o se encuentran fragmentadas; 2) hacer determinaciones *in situ* de la actividad de la nitrogenasa, con el fin de valorarla en condiciones naturales; 3) detectar si existen morfotipos que puedan servir como indicadores de degradación del suelo; 4) investigar cuáles son las sustancias húmicas provenientes de las cortezas; 5) analizar cómo es la sucesión entre las cortezas planas (con poco desarrollo) y las cortezas rugosas ("maduras") en un ambiente degradado, en contraposición con los estudios que se han llevado a cabo en ecosistemas prístinos (Evans y Belnap 1999).

Los resultados del presente estudio han planteado incluso realizar investigación sobre la biogeografía de *Microcoleus paludosus*, morfotipo dominante en las cortezas de la Sierra de la Laguna y al parecer ausente en las cercanas llanuras colindantes e incluso en localidades más lejanas del Desierto Sonorense (Belnap y Gardner 1993, Grondin y Johansen 1993, García-Pichel y Belnap 1996, Flechtner *et al.* 1998, García-Pichel *et al.* 2001).

#### 6.5 PERSPECTIVAS DE LOS PROCESOS EROSIVOS EN LA SIERRA DE LA LAGUNA A CORTO, MEDIANO Y LARGO PLAZO

En la Fig. 6.1 se muestra un diagrama que representa cómo es la erosión en la Sierra de la Laguna, a partir de los resultados obtenidos. Como quedó demostrado, la suma de procesos de desertización con el impacto antropogénico han causado un gran deterioro de los suelos en el norte de la Sierra de la Laguna, en la colindancia de la Región del Cabo con las llanuras áridas del Desierto Sonorense. Si en 18 años la superficie erosionada aumentó en más del 100%, es de esperarse que, de no tomarse medidas inmediatas, la degradación del suelo alcanzara en esta región proporciones tales que sería prácticamente irrecuperable.

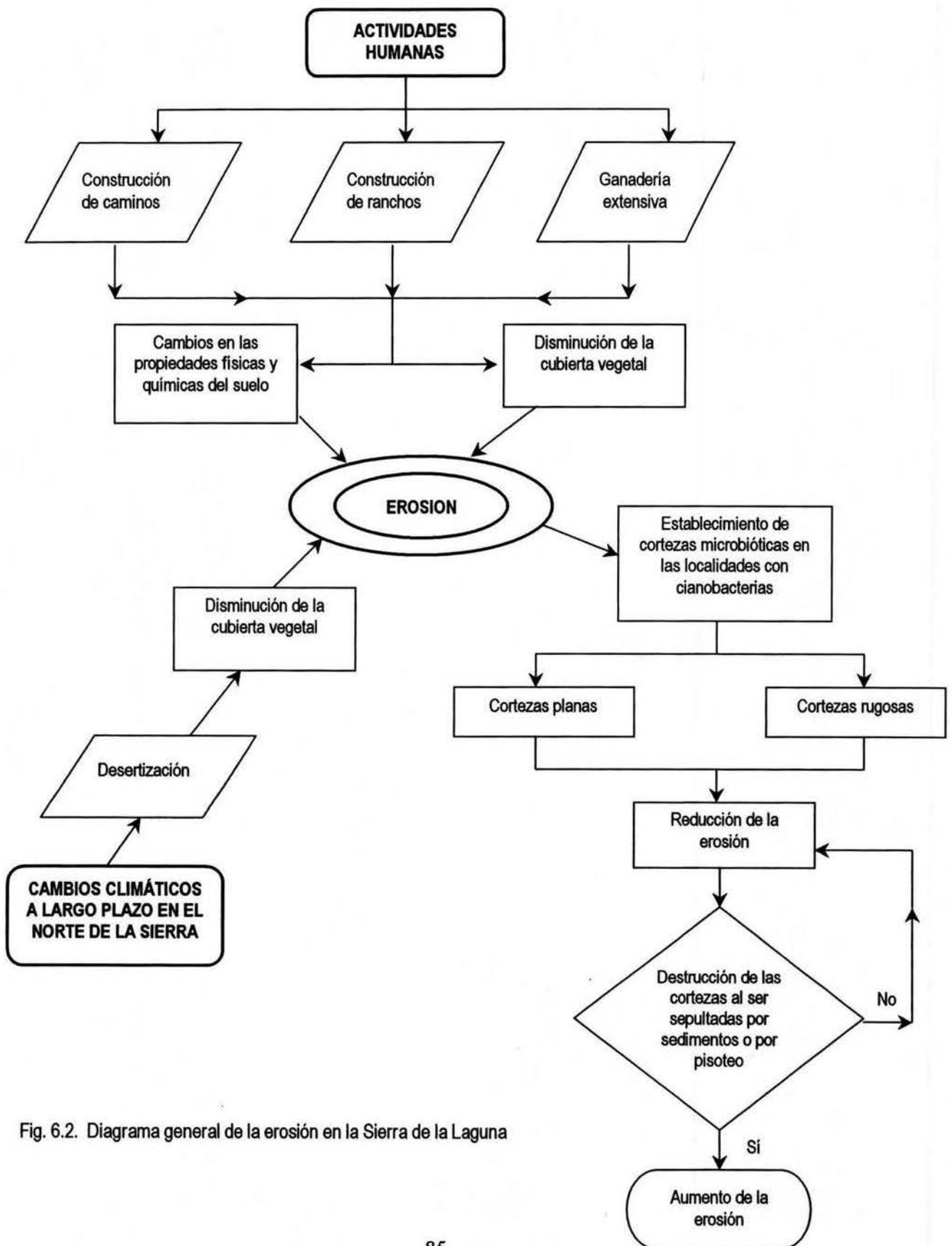


Fig. 6.2. Diagrama general de la erosión en la Sierra de la Laguna

El resultado más visible, por estar asociado a aspectos económicos, sería que la tierra se volviera totalmente improductiva, de tal manera que los ganaderos se vieran forzados a abandonar estas actividades. Lo peor sería el deterioro del ecosistema en general, al quedar expuesto a deslaves, derrumbes y al aumento gradual de la superficie afectada por la erosión, en un proceso de desertificación de gran magnitud.

A mediano y largo plazo los mismos procesos se podrían presentar en las otras dos localidades, e incluso en otras que fueran desmontadas con otros fines, para la creación de infraestructura turística por ejemplo. Este es un factor de presión que no fue analizado en este trabajo, pero que es posible que en el futuro llegue a ser importante. El reciente desarrollo del polo turístico Cabo San Lucas – San José del Cabo, que se había dado básicamente alrededor de la pesca deportiva, ha vuelto los ojos hacia paisajes más terrestres. Esta podría constituir una amenaza para la estabilidad de la sierra, si no se planea adecuadamente. Estudios como éste pueden contribuir en la toma de decisiones de los encargados de la planificación.

Dos de las localidades estudiadas (San Antonio de la Sierra y El Crucero) se localizan en la zona de amortiguamiento del área decretada como reserva de la biosfera. Los encargados de la administración llevan a cabo un programa permanente de reforestación, lamentablemente con pobres resultados hasta ahora. Es muy probable que la aplicación de cianobacterias fijadoras de nitrógeno en los suelos durante las primeras etapas de trasplante pudiera mejorar el éxito de estos programas. Se han mantenido pláticas con los administradores para llevar a cabo actividades conjuntas. Se espera que en el futuro se pueda concretar algún tipo de colaboración.

## 7. CONCLUSIONES

- A pesar de tener una densidad de población muy baja y de que ésta ha disminuido en los últimos años, el 5 % de la superficie de la Sierra de la Laguna se encuentra erosionada, particularmente dentro de la selva baja caducifolia.
- La superficie erosionada se ha incrementado en fechas recientes, en magnitud suficiente para ser detectada por medio de la percepción remota.
- La ganadería promueve la erosión al afectar negativamente las características físicas del suelo. Los cambios sobre las características químicas parecen no tener una influencia negativa relacionada con la erosión.
- La erosión en la selva baja de la Sierra de la Laguna no se debe a variables intrínsecas, tales como el tipo de suelo, el clima, el tipo de vegetación y las características fisiográficas del macizo montañoso, por lo que se rechaza la hipótesis nula y se acepta la alternativa, que propone que la erosión en la Sierra de la Laguna se debe al impacto de las actividades productivas, particularmente la ganadería extensiva, que se desarrollan principalmente dentro de la selva baja caducifolia.
- El norte de la sierra es la región más vulnerable a la desertificación porque el impacto de las actividades antrópicas se suma a procesos de desertización a largo plazo.
- La creación de infraestructura asociada a la ganadería extensiva (construcción de caminos y ranchos) tiene mayor impacto sobre el suelo que el pastoreo.
- Las cortezas microbióticas, en especial los morfotipos de cianobacterias fijadoras de nitrógeno resistentes a la manipulación que conlleva el aislamiento y cultivo, se vislumbran como posibles biomejoradoras del suelo. Estos podrían ser aplicados durante los programas de reforestación con el objeto de lograr un mayor porcentaje de éxito. Cabe señalar que una de las grandes ventajas de utilizar estos organismos es que son nativos del mismo ecosistema, por lo que no representarían un riesgo para la biodiversidad de estos grupos en la Sierra de la Laguna.

## 8. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Adler P.B. y W.K. Lauenroth. 2000. Livestock exclusion increases the spatial heterogeneity of vegetation in Colorado shortgrass steppe. *Applied Vegetation Science* 3(2):213-222.
- Anagnostidis, K. y J. Komárek. 1988. Modern approach to the classification system of Cyanophytes: 3 – Oscillatoriales. *Archives of Hydrobiology Supplement* 80(1-4)/*Algological Studies* (50-53): 327-472.
- Anderson, T. F. 1956. Electron Microscopy of Microorganisms. *Physics and Technical Biological Research* III:178-181.
- Anderson, D.C. y S.R. Rushforth. 1976. The cryptogamic flora of desert soil crusts in southern Utah. *Nova Hedwigia* 28:691-729.
- Anónimo. 1977a. *Informe de la Reunión preparatoria regional para las Américas, hacia la Conferencia de las Naciones Unidas sobre la Desertificación*. Santiago de Chile. 23 al 26 de febrero de 1977. (DES CONF/AMERICAS/10). 18 pp.
- Anónimo. 1977b. UNCOD A/CONF 74/36. *Report on the UN Conf. on Desertification*, Nairobi. 150 pp.
- Armstrong C.L. y J.K. Mitchell. 1987. Transformations of rainfall by plant canopy. *Transactions American Society of Agricultural Engineers* 30(3):688-696.
- Arriaga L y J Cancino. 1992. Prácticas pecuarias y caracterización de especies forrajeras en la selva baja caducifolia. Cap. 8. In: A Ortega (ed.) *Uso y manejo de los recursos naturales en la Sierra de la Laguna, Baja California Sur*. Pub. No. 5 del Centro de Investigaciones Biológicas de Baja California Sur, A.C. La Paz, México. Pp. 155-184.
- Arriaga L, Y. Maya, S. Diaz y J. Cancino. 1993. Association between cacti and nurse perennials in a heterogeneous tropical dry forest in northwestern Mexico. *Journal of Vegetation Science* 4 (3):349-356.
- Arriaga, L. y A. Ortega (eds.). 1988. *La Sierra de la Laguna de Baja California Sur*. Publ. No. 1 del Centro de Investigaciones Biológicas de Baja California Sur. México.
- Arriaga, L. y J. L. León de la Luz. 1989. The Mexican tropical deciduous forest of Baja California Sur: a floristic and structural approach. *Vegetatio* 84:45-52.
- Aubreville, A. 1949. *Climats, forêts et désertification de l'Afrique tropicale*. Société d'Éditions Géographiques, Maritimes et Coloniales. Paris. 255 pp.
- Ayuba HK. 2001. Livestock grazing intensities and soil deterioration in the semi-arid rangeland of Nigeria: effects on soil chemical status. *Discovery and Innovation* 13(3-4):150-155.
- Bailey, D., A.P. Mazurak y J.R. Rosowski. 1973. Aggregation of soil particles by algae. *Journal of Phycology* 9:99-101.
- Barrow, C.J. 1991. *Land degradation*. Cambridge University Press. Gran Bretaña. 295 pp.
- Belnap J. y J.S. Gardner. 1993. Soil microstructure in soils of the Colorado Plateau: the role of cyanobacterium *Microcoleus vaginatus*. *The Great Basin Naturalist* 53:40-47.
- Belnap, J. y O.L. Lange (eds.). 2001. *Biological soil crusts: structure, function and management*. Ecological Studies, Vol. 150. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 503 pp.
- Belz, S., L. Beldjoudi, S. Lahlah y W. Zhang. 1998. Runoff modelling in northern Algeria using a distributed physically-based model integrating remote sensing data. In: W. Summer y E. Klaghofer (eds.). *Modelling soil erosion, sediment transport and closely related hydrological processes*. Proceedings of an international symposium, Vienna, Austria, 13 to 17 July 1998. IAHS Publication No. 249. Pp. 203-209.

- Bocco, G. y C.R. Valenzuela. 1988. Integration of GIS and image processing in soil erosion studies using ILWIS. *ITC Journal* 1988-4.
- Bocco, G., J. Palacio y C.R. Valenzuela. 1990. Gully erosion modelling using GIS and geomorphologic knowledge. *ITC Journal* 1990-3.
- Bonn, F. y G. Rochon. 1992. *Précis de Télédétection. Vol 1: Principes et Méthodes*. Universités Francophones. Presses de l'Université du Québec. 485 pp.
- Boone, D.R. y R.W. Castenholz. 2001. *Bergey's Manual of Systematic Bacteriology. Vol. 1. The Archaea and the Deeply Branching and Phototrophic Bacteria*. 2<sup>nd</sup> ed. Springer. pp. 473-599.
- Breceda, A. 1994. *La selva baja caducifolia y la vegetación de cañada en la Sierra de La Laguna, B.C.S.* Tesis de Maestría. Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F.
- Breceda, A. y J.A. Ramirez. Areas prioritarias para la conservación y restauración de la Reserva de la Biosfera Sierra de la Laguna, B.C.S., Mex. In: *Tópicos de Ecología en el Municipio de La Paz*. X Ayuntamiento de La Paz. Gobierno del Estado de Baja California Sur. En prensa.
- Breceda, A., Arriaga, L. y Y. Maya. 1997. Forest Resources of the Tropical Dry Forest and Riparian Communities of Sierra de la Laguna, Biosphere Reserve, Baja California Sur, Mexico. *Journal of the Arizona-Nevada Academy of Science* 30(1): 1-16.
- Breceda, A., J.L. León de la Luz y L. Arriaga. 1994. Phytogeographic relationships of the tropical dry forest of Baja California Sur with the Sonoran Desert and the nearest tropical vegetation of mainland Mexico. *Mémoires de la Société de Biogéographie, Serie. 3. No. 4:* 45-52.
- Breedlove, D. E. y J. L. León de la Luz. 1989. A New *Daphnopsis* (Thymelaeaceae) from Baja California Sur, Mexico. *Madroño* 36:266-270.
- Cameron, R.E. 1960. Communities of soil algae occurring in the Sonoran Desert in Arizona. *Journal of the Arizona Academy of Sciences* 1:85-88.
- Cameron, R.E. y G.B. Blank. 1966. Desert algae: soil crusts and diaphanous substrata as algal habitats. *Jet Propulsion Lab Technical Report* 32-971. Pasadena, Cal.
- Campbell, S.E. 1979. Soil stabilization by a prokaryotic desert crust: implications for Precambrian land biota. *Origins of Life* 9:335-348.
- Campbell, S.E., J.S Seeler y S. Golubic. 1989. Desert crust formation and soil stabilization. *Arid Soil Research and Rehabilitation* 3:217-228.
- Carmichael, W.W. 1986. Isolation, culture and toxicity testing of toxic freshwater cyanobacteria (blue-green algae). In: V. Shilov (ed.). *Fundamental Research in Homogeneous Catalysis* Vol. 3, pp. 1249-1262. Gordon and Breach, New York.
- Casalegno, S. 2001. *Caractérisation et cartographie d'un écotone forestier de montagne afin de fournir des indicateurs de perturbations d'origine anthropique. Analyse à différents niveaux d'appréciation et spatialisation de la transition chênaie-forêt tropicale caducifoliée sur le massif de la Laguna au Mexique*. Tesis de doctorado. Institut National Agronomique Paris-Grignon.
- Castenholz, R.W. 1989. Subsection IV, order Nostocales. In: J.T. Staley, M.P. Bryant, N. Pfenning y J.G. Holt (eds.). *Bergey's Manual of Systematic Bacteriology*, Vol. 3. Williams & Wilkins Co., Baltimore. Pp. 1780-1793.
- Castenholz, R.W. 2001. General characteristics of the Cyanobacteria. In: Boone, D.R. y R.W. Castenholz (eds.). *Bergey's Manual of Systematic Bacteriology. Vol. 1. The Archaea and the Deeply Branching and Phototrophic Bacteria*. 2<sup>nd</sup> ed. Springer. Pp. 474 – 480.

- Castenholz, R.W., R. Rippka, M. Herdman y A. Wilmotte. 2001, Subsection III. (Formerly Oscillatoriales). In: Boone, D.R. y R.W. Castenholz (eds.). *Bergey's Manual of Systematic Bacteriology*. Vol. 1. *The Archaea and the Deeply Branching and Phototrophic Bacteria*. 2<sup>nd</sup> ed. Springer. Pp. 539-562.
- Clark Labs. 2003. *Software IDRISI versión 14.0 (Kilimanjaro)*. Clark University. Massachussets, USA.
- Comisión de Estudios del Territorio Nacional. 1978. Cubrimiento fotográfico de la Zona 48-A, escala 1:80,000 (Rollo 294, Líneas 34 y 36; Rollo 185, Líneas 35 y 37; Rollo 202, Líneas 38, 39 y 40). Secretaría de Programación y Presupuesto. México, D.F.
- Cook, H.L. 1936. The nature and controlling variables of the water erosion process. *Soil Science Society of America Proceedings* 1:60-64.
- Coria, R. 1988. Climatología. In: L. Arriaga y A. Ortega (eds.). *La Sierra de la Laguna de Baja California Sur*. Publ. No. 1 del Centro de Investigaciones Biológicas de Baja California Sur. México. Pp. 45-52.
- Corsi F., J de Leeuz y A. Skidmore. 2000. Modeling species distribution with GIS. Cap. 5 In: L. Boitani y T.K.Fueler (eds.). *Research techniques in animal ecology: controversies and consequences. Methods and Cases in Conservation Science*. Columbia University Press. New York, USA. Pp. 389-434.
- Degens, B.P. 2001. Microbial catabolic evenness: a potential integrative indicator of organic matter management? In: R.M. Rees, B.C. Ball, C.D. Campbell y C.A. Watson (eds.). *Sustainable Management of Soil Organic Matter*. CABI Publishing. U.K. Pp. 357-362.
- Desmet, P.J.J. y G. Govers, 1996. A GIS-procedure for automatically calculating the USLE LS-factor on topographically complex landscape units. *Journal of Soil and Water Conservation* 51 (5): 427-433.
- Díaz, S.C., C.A. Salinas-Zavala y L. Arriaga. 1994. An interannual climatological aridity series for the Sierra de la Laguna, B.C.S., Mexico. *Mountain Research and Development* 14(2):137-146.
- Dregne, H.E. 1986. Desertification of arid lands. In: *Physics of desertification*. F. El-Baz y M.H.A. Hazaaan (eds.). Dordrecht, Holanda: Martinus, Nijhoff.
- Duchaufour P. 1995. *Pédologie: sol, végétation, environnement*. 4a. ed. Masson, Paris. 324 pp.
- Elenkin, A. A. 1934. Ob osnovnykh principakh sistemy Cyanophyceae. *Sov. Bot.* 1934:51-83.
- Elridge, D.J. 1993. Cryptogam cover and soil surface condition : effects on hydrology on a semi-arid woodland soil. *Arid Soil Research and Rehabilitation* 7:203-217.
- Elridge, D.J. y R.S.B. Greene. 1994. Microbiotic soil crusts : a review of their roles in soil and ecological processes in the rangelands of Australia. *Australian Journal of Soil Research* 32:389-415.
- Escadafal, R. y S. Bacha. 1996. Strategy for the dynamic study of desertification. En: *Monitoring Soils in the Environment with Remote Sensing and GIS*. R. Escadafal, M.A. Mulders y T. Lamourdia (eds.) ORSTOM Editions. Paris. Pp. 19-34.
- Evans, R.D. y J. Belnap. 1999. Long-term consequences of disturbance on nitrogen dynamics in an arid ecosystem. *Ecology* 80:150-160.
- Evans, R.D. y J.R. Johansen. 1999. Microbiotic Crusts and Ecosystem Processes. *Critical Reviews in Plant Sciences* 18(2):183-225.
- Field, L.Y. y B.A. Engel. 1997. Best management practices for soil erosion. Agricultural Engineering, Purdue University. <http://abe.www.ecn.purdue.edu/~agen521/epadir/erosion> (6 jun. 1997).

- Figuroa B., A. Amante, H.G. Cortés, J. Pimentel, E. S. Osuna, J.M. Rodríguez y F.J. Morales. 1991. *Manual de predicción de pérdidas de suelo por erosión*. Colegio de Posgraduados. Chapingo, México. 150 pp.
- Flechtner, V.R., J.R. Johansen y W.H. Clark. 1998. Algal composition of microbiotic crusts from the Central Desert of Baja California, Mexico. *The Great Basin Naturalist* 58(4):295-311.
- Fletcher, J.E. y W.P. Martin. 1948. Some effects of algae and molds in the rain-crust of desert soils. *Ecology* 29:95-100.
- Fließbach, A. F. Eyhorn, P. Mäder, D.I. Rentsch y R. Hany. 2001. 'DOK' long-term farming systems trial: microbial biomass, activity and diversity affect the decomposition of plant residues. In: R.M. Rees, B.C. Ball, C.D. Campbell y C.A. Watson (eds.). *Sustainable Management of Soil Organic Matter*. CABI Publishing. U.K. Pp. 363-369.
- Folk RL. 1969. *Petrología de rocas sedimentarias*. Instituto de Geología de la UNAM Traducida del inglés por C Schlaepfer y RM Schmiter. México, D.F.
- Foster, G.R. y W.H. Wischmeier. 1974. Evaluating irregular slopes for soil loss prediction. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* 17(2):305-309.
- Franklin S.E. y B.A. Wilson. 1992. A three stage classifier for remote sensing of mountain environments. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 58(4):449-454.
- Freund, J. E. y R. E. Walpole. 1987. *Mathematical statistics*. 4th ed. Prentice-Hall. Englewood Cliffs, NJ.
- García, E. 1973. *Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana)*. 2a. ed. Instituto de Geografía, UNAM. México. 252 pp.
- García-Pichel, F. y J. Belnap. 1996. Microenvironments and microscale productivity of cyanobacterial desert crusts. *Journal of Phycology* 32:774-782.
- García-Pichel, F., A. López-Cortés y U. Nüebel. 2001. Phylogenetic and morphological diversity of cyanobacteria in soil desert crusts from Colorado Plateau. *Applied Environmental Microbiology* 67:1902-1910.
- Geitler, L. 1932. Cyanophyceae. In: Kolkwitz (ed.). *Rabenhorst's Kryptogamenflora von Deutschland*. Österreich und der Schweiz. Vol. 14. Akademische Verlags, Leipzig.
- Gentry, H.S. 1942. *Rio Mayo plants*. Carnegie Institution of Washington. Publ. 527. 328 pp.
- Gifford G.F. 1978. Infiltration studies in rangeland plant communities of the northern territory. *Australian Rangeland Journal* 1:142-149.
- Glantz, M.H. y N. Orlovsky. 1983. Desertification: a review of the concept. *Desertification Control Bulletin* 9:15-22.
- Grondin, A.E. y J.R. Johansen. 1993. Microbial spatial heterogeneity in microbiotic crusts in Colorado National Monument. I. Algae. *The Great Basin Naturalist* 53:24-30.
- Guertin, P.D, P.F. Ffolliott y M.M. Fogel. 1988. Características fisiográficas e hidrológicas. In: L. Arriaga y A. Ortega (eds.). *La Sierra de la Laguna de Baja California Sur*. Publ. No. 1 del Centro de Investigaciones Biológicas de Baja California Sur. México. Pp 37-43.
- Harper, K.T. y J.R. Marble. 1988. A role for nonvascular plants in management of arid and semiarid rangelands. In: P.T. Tueller, (ed.). *Vegetation science applications for rangeland analysis and management*, pp. 135-169. Kluwer Academic Publishers, Boston.
- Hartmann, A., B. Aßmus, G. Kirchhof y M. Schloter. 1997. Direct approaches for studying soil microbes. In: J.D. Van Elsas, J.T. Trevors y E.M.H. Wellington (eds.). *Modern Soil Microbiology*. Marcel Dekker Inc. New York. 712 pp.
- Hernández-Dávila J, R. Escoppinichi y RA León. 1991. *Manual operativo del Laboratorio de Suelo y Agua*. UABCS. Area Interdisciplinaria de Ciencias Agropecuarias. La Paz. 91 pp.

- Hill, J. 1994. Spectral properties of soils and the use of optical remote sensing systems for soil erosion mapping. In: G. Bidoglio y W. Stumm (eds.). *Chemistry of Aquatic Systems: Local and Global Perspectives*. ECSC, EEC, EAEC, Bruselas y Luxemburgo. Holanda. Pp 497-526.
- Hill, J., W. Mehl y M. Altherr. 1994. Land degradation and soil erosion in a mediterranean ecosystem. In: J. Hill y J. mégier (eds.). *Imaging Spectrometry – a tool for environmental observations*. ECSC, EEC, EAEC, Bruselas y Luxemburgo. Netherlands. Pp. 237-260.
- Holt, J.G., N.R. Krieg, P.H.A. Sneath, J.T. Staley, S.T. Williams. 1994. *Bergey's Manual of Determinative Bacteriology*. 9<sup>a</sup>. ed. Williams & Wilkins. EUA. 787 pp.
- INEGI. 1998. *Carta topográfica 1:50,000 F12B44 San José del Cabo*.
- INEGI. 2000. Base de datos de Baja California Sur del XII Censo General de Población y Vivienda. [http://www.inegi.gob.mx/est/librerias/tabulados.asp?tabulado=tab\\_po01a&c=705&e=](http://www.inegi.gob.mx/est/librerias/tabulados.asp?tabulado=tab_po01a&c=705&e=)
- Jackson M.L. 1982. *Análisis químico de suelos*. 4a. ed. Ediciones Omega. Barcelona. 662 pp.
- Jensen, B.B., y R.P. Cox. 1983. Direct measurements of steady-state kinetics of cyanobacterial N<sub>2</sub> uptake by membrane-leak mass spectrometry and comparisons between nitrogen fixation and acetylene reduction. *Applied Environmental Microbiology* 45:1331-1337.
- Johansen, J.R. 1993. Cryptogamic crusts of semiarid and arid lands of North America. *Journal of Phycology* 29:140-147.
- Kidron, G.J., D.H. Yaalon y A. Vonshak. 1999. Two causes for runoff initiation on microbiotic crusts: hydrophobicity and pore clogging. *Soil Science* 164(1):18-27.
- Kinnell, P.I.A., C. Huang, L.D. Norton y F. Zheng. 2001. Comments on vertical hydraulic gradient and run-on water and sediment effects on erosion processes and sediment regimes. *Soil Science Society of America Journal* 65:953-956.
- Kirkby, M.J. y R.P.C. Morgan. 1984. *Erosión de Suelos*. Ed. Limusa-Wiley. México. 375 pp.
- Komárek, J. y K. Anagnostidis. 1989. Modern approach to the classification system of Cyanophytes: 4 – Nostocales. *Archives of Hydrobiology Supplement* 82(3)/*Algological Studies* 56:247-345.
- León de la Luz, J.L. y R. Domínguez. 1989. Flora of the Sierra de la Laguna, Baja California Sur, Mexico. *Madroño*. 36:61-81.
- López-Cortés, A. y Y. Maya-Delgado. 2003. Cryptobiotic cyanobacteria: an alternative in organic agriculture. *Archives in Hydrobiology / Algological Studies* 109(387-394).
- López-Cortés, A., Y. Maya-Delgado, E. Troyo-Diéguez y L. Landa-Hernández. 2001. Cianobacterias criptobióticas: una alternativa de agricultura orgánica. Publicación de Transferencia y Divulgación No. 7. Programa de Agricultura en Zonas Áridas-CIBNOR, Fundación Produce Baja California Sur, A.C., CONACYT ISBN 970-18-6802-1.
- Luk, S.H. 1979. Effects of soil properties on erosion by wash and splash. *Earth Surface Processes* 4:241-255.
- MapInfo Corporation. 1998. *Software MapInfo Profesional versión 5.0.1*. New York, USA.
- Martín, P.S., D. Yetman, M. Fishbein, P. Jenkins, T.R. van Devender y R.K. Wilson (eds.). 1998. *Gentry's Rio Mayo plants: the tropical deciduous forest and environs of Northwest Mexico*. Tucson: University of Arizona Press. 558 pp.
- Martínez, A.M. 1997. *Contenido de arsénico en el agua subterránea de la zona minera de San Antonio, B.C.S., México: relación con los yacimientos minerales y obras mineras*. Tesis de Licenciatura. Departamento de Geología Marina, UABCS. La Paz, México. 63 pp.
- Martínez-Balboa A. 1981. *La Ganadería en Baja California Sur*. Vol. I. Edit. J.B. La Paz, México. 229 pp.

- Martonne, de E. 1926. Areisme et indice d'aridité, comptes rendus de L'Academie des Sciences de Paris 182:1393-1398. En inglés: Regions of Interior-Basin drainage. *The Geographical Review* 17:397-414.
- Maya, Y. 1988. Edafología. In: L. Arriaga y A. Ortega (eds.). *La Sierra de la Laguna de Baja California Sur*. Publ. No. 1 del Centro de Investigaciones Biológicas de Baja California Sur. México. Pp. 53-65.
- Maya, Y. 1991. Caracterización edafológica de la Sierra de la Laguna en Baja California Sur, México. *Revista de la Investigación Científica, Serie Ciencias Agropecuarias* 2(1):13-24.
- Maya, Y. 1994. Soil - Climate - Vegetation relationships in the Sierra de la Laguna, component of the Sierra Madrean Woodland Element. In: *Biodiversity and management of the Madrean Archipelago*. General Technical Report RM-GTR-264 of the United States Department of Agriculture.
- Maya, Y., A. López-Cortés y A. Soeldner. 2002. Cyanobacterial microbiotic crusts in eroded soils of a tropical dry forest in the Baja Peninsula, Mexico. *Geomicrobiology Journal* 19:505-518.
- Maya, Y., B. Lacaze, M. Monteforte y M-F Passini. 2004. Análisis de Imágenes SPOT: erosión en la región montañosa del sur de la Península de Baja California, México. *Terra* 22:23-34.
- Miller, R. 1986. *Beyond ANOVA, Basics of Applied Statistics*. John Wiley & Sons. New York.
- Millward, A.A. y J.E. Mersey. 1999. Adapting the RUSLE to model soil erosion potential in a mountainous tropical watershed. *Catena* 38:109-129.
- Morelos, S. 1988. La vegetación: una aproximación a través de la fotointerpretación. In: L. Arriaga y A. Ortega (eds.). *La Sierra de la Laguna de Baja California Sur*. Publ. No. 1 del Centro de Investigaciones Biológicas de Baja California Sur. México. Pp. 69-81.
- Mulders, M.A. 1977. Applications of detection in pedology. *Memorias del 1er. Colloque Pedologie et Télédetection*. Roma, 29 de agosto al 3 de septiembre. Pp. 331-339.
- Murphy, P.G. y A.E. Lugo. 1986. Ecology of tropical dry forest. *Annual Review of Ecology and Systematics* 17:67-88.
- Naranjo-Pulido A., H. Romero-Smith, L Mendez-Rodríguez, B. Acosta-Vargas y A. Ortega-Rubio. 2002. Soil arsenic contamination in the Cape Region, B.C.S., Mexico. *Journal of Environmental Biology* 23(4):347-352.
- Nearing, M.A. 1997. A single, continuous function for slope steepness influence on soil loss. *Soil Science Society of America Journal* 61(3):917-919
- Oades, J.M. 1984. Soil organic matter and structural stability: mechanisms and implications for management. *Plant and Soil* 76:319-337.
- Ortega, A. (ed.). 1992. *Uso y Manejo de los Recursos Naturales Terrestres en la Sierra de La Laguna*. Centro de Investigaciones Biológicas de Baja California Sur-World Wildlife Fund. Publicación. No. 5. La Paz, B.C.S.
- Ortega-Calvo, J.J. y L.J. Stal. 1991. Diazotrophic growth of the unicellular cyanobacterium *Gloethece* sp. PCC 6909 in continuous culture. *Journal of General Microbiology* 137:1789-1797.
- Ortiz, V. 2001. *Efecto del ramoneo por ganado vacuno en una población de Lysiloma divaricata (Jacq.) Macbr. "mauto" (Leguminosae) en una selva baja caducifolia del noroeste de México*. Tesis de Maestría. Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C. La Paz, B.C.S.
- Padilla, G., S. Pedrín y E. Díaz. 1988. Historia geológica y paleoecología. In: L. Arriaga y A. Ortega (eds.). *La Sierra de la Laguna de Baja California Sur*. Publ. No. 1 del Centro de Investigaciones Biológicas de Baja California Sur. México. Pp. 27-36.

- Parizek B., C.M. Rostagno y R. Sotini. 2002. Soil erosion as affected by shrub encroachment in northeastern Patagonia. *Journal of Range Management* 55:43-48.
- Passini, M.-F. 1987a. The endemic pinyon of Lower California: *Pinus lagunae* M.F.-Passini. *Phytologia* 6(5):337-338.
- Passini, M.-F. 1987b. Morphology and phenology of *Pinus lagunae* M.F.-Passini. *Phytologia* 6(5):331-336.
- Passini, M.-F. y N. Pinel. 1989. Ecology and phytogeography of *Pinus lagunae* formations, Sierra de la Laguna. *Madroño* 36(2):84-92.
- Postgate, J.R. 1972. The acetylene reduction test for nitrogen fixation. In: J.R. Norris y D. W. Ribbons (eds.). *Methods in Microbiology* Vol. 6B, pp 343-356. Academic Press Inc. New York.
- Prufert-Bebout, L. y F. García-Pichel. 1994. Field and cultivated *Microcoleus chthonoplastes*: the search for clues to its prevalence in marine microbial mats. *NATO ASI Series, G* 35:111-116.
- Ramírez, J.A. 2001. *Identificación de áreas críticas para la protección de la biodiversidad en la Reserva de la Biosfera "Sierra de la Laguna", Baja California Sur, México*. Tesis de Maestría. Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C. La Paz, B.C.S. 94 pp y anexos.
- Reitemeier R.F. 1946. Effect of moisture content on the dissolved and exchangeable ions of arid regions. *Soil Science* 61:195-213.
- Renard, K.G., G.R. Foster, G.A. McCool y D.C. Yoder. 1997. *Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)* Handbook 703. U.S. Department of Agriculture, 404 pp.
- Reyes S. y A. Mejía-Trejo. 1991. Tropical perturbations in the Eastern Pacific and the precipitation field over North-Western Mexico in relation to the ENSO phenomenon. *International Journal of Climatology* 11:515-528.
- Riney, T. 1982. *Study and management of large mammals*. John Wiley & Sons Ltd. Gran Bretaña.
- Rippka, R. 1988. Isolation and purification of Cyanobacteria. *Methods in Enzymology*, Vol. 167.
- Rippka, R., J.B. Waterbury, y R.Y. Stanier. 1981. Isolation and purification of cyanobacteria: some general principles. In: Starr M.P. et al. (eds.). *The Prokaryotes*, pp. 212-223. Springer-Verlag. New York.
- Rippka, R., J. Deruelles, J.B. Waterbury, M. Herdman y R.Y. Stanier. 1979. Generic assignments, strain histories and properties of pure cultures of Cyanobacteria. *Journal of General Microbiology* 111:1-61
- Rippka, R., R.W. Castenholz y M. Herdman. 2001. Subsection IV. (Formerly Nostocales). In: Boone, D.R. y R.W. Castenholz (eds.). *Bergey's Manual of Systematic Bacteriology. Vol. 1. The Archaea and the Deeply Branching and Phototrophic Bacteria*. 2<sup>nd</sup> ed. Springer. Pp. 562-589.
- Risse, L.M., M.A. Nearing, A.D. Nicks y J.M. Laflen. 1993. Errors assessment in the Universal Soil Loss Equation. *Soil Science Society of America Journal* 57:825-833.
- Salinas, C.A., A. Leyva, D. Lluch y E. Díaz. 1990. Distribución geográfica y variabilidad climática de los regímenes pluviométricos en Baja California Sur. *Atmosfera* 3:217-237.
- Salinas-Zavala, C.A., D. Lluch-Belda, S. Hernández-Vázquez y D.B. Lluch-Cota. 1998. La aridez en el noroeste de México. Un análisis de su variabilidad espacial y temporal. *Atmosfera* 11:29-44.
- Saunders, I. y A. Young. 1983. Rates of surface processes on slopes, slope retreat and denudation. *Earth Surface Processes and Landforms* 8(5):473-501.

- Schwab, G.O., R. K. Frevert, T. W. Edminster y K. K. Barnes. 1990. *Ingeniería de Conservación de Suelos y Aguas*. 1a. Ed. Noriega Editores. LIMUSA. México.
- Sistema Nacional de Fotografía Aérea. 1993. Cubrimiento fotográfico de la hoja F12-2-3-5-6 San José del Cabo, escala 1:75,000. INEGI. Aguascalientes, México.
- Stal, L.J. 1988. Nitrogen fixation in cyanobacterial mats. *Methods in Enzymology* 167:474-484.
- Strickland J.D.H. y T.R. Parsons. 1972. *A practical handbook of seawater analysis*. Editorial Fisheries Research Board of Canada. Ottawa.
- Summer, W., W. Summer, E. Klaghofer y W. Zhang. 1998. Developments in physically-based overland flow modelling. In: *Modelling soil erosion, sediment transport and closely related hydrological processes*. Proceedings of an international symposium, Vienna, Austria, 13 to 17 July 1998. W. Summer y E. Klaghofer (eds.). IAHS Publication No. 249. IAHS Press. Wallingford, Gran Bretaña. Pp. 33-43.
- Tisdall, J.M. y J.M. Oades. 1982. Organic matter and water-stable aggregates in soils. *Journal of Soil Science* 33:141-163.
- Trimble, S.W. 1990. Geomorphic effects of vegetation cover and management: some time and space considerations in prediction of erosion and sediment yield. In: J.B. Thornes (ed.) *Vegetation and Erosion*. John Wiley & Sons, Ltd. Pp.55-65.
- Turner M. 1998. Long-term effects of daily grazing orbits on nutrient availability in Sahelian West Africa: 1. Gradients in the chemical composition of rangeland soils and vegetation. *Journal of Biogeography* 25(4):669-682.
- van Oost, K., G. Govers y P. Desmet. Evaluating the effects of changes in landscape structure on soil erosion by water and tillage. *Landscape Ecology*. En prensa.
- Verrecchia, E., A. Yair, G.J. Kidron y K. Verrecchia. 1995. Physical properties of the psammophile cryptogamic crust and their consequences to the water regime of sandy soils, north-western Negev Desert, Israel. *Journal of Arid Environments* 29:427-437.
- Walkley A. y I.A. Black. 1934. An examination of methods for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science* 37:29-38.
- Westoby, M. 1980. Elements of a theory of vegetation dynamics in arid rangelands. *ISR Journal of Botany* 28(3-4):169-194.
- Wilmotte, A. 1994. Molecular evolution and taxonomy of the Cyanobacteria. In: D.A. Bryant (ed.) *The molecular biology of Cyanobacteria*. Kluwer Academic Publishers. Netherlands. Pp. 1 - 25.
- Wischmeier W.H. y D.D. Smith. 1978. Predicting rainfall erosion losses. *Agronomy Handbook* 537. U.S. Department of Agriculture. Washington, D.C. 58 pp.
- Wischmeier, W.H., C.B. Johnson y B.V. Cross. 1971. A soil erodability nomogram for farmland and construction sites. *Journal of Soil and Water Conservation* 26:189-193.
- Yagama, R.K., S.S. Prasad y G.J. Reddy. 1990. Deforestation and its consequences - a formidable situation in India. *Environment Ecology* 8(1A):192-196.
- Yeager, C.M., J.L. Kornosky, D.C. Housman, E.E. Grote, J. Belnap y C.R. Kuske. 2004. Diazotrophic community structure and function in two successional stages of biological soil crusts from the Colorado Plateau and Chihuahuan Desert. *Applied and Environmental Microbiology* 70(2):973-983.

## ANEXO 1

### Resultados de los análisis físico – químicos de las muestras recolectadas en el experimento de exclusión a la ganadería

Tratamientos: NE = parcela no excluida; E = parcela excluida

Profundidades: A = 0 – 5 cm; B = 5 – 15 cm

En textura: %A = porcentaje de arena; %L = porcentaje de limo; %R = porcentaje de arcilla

C.E. = Conductividad eléctrica

| No. muestra | TEXTURA |       |       |       | pH  | C.E<br>μS/cm | Ca <sup>2+</sup><br>meq/100 g Suelo | Mg <sup>2+</sup><br>meq/100 g Suelo | Na <sup>+</sup><br>meq/100 g Suelo | K <sup>+</sup><br>meq/100 g Suelo |
|-------------|---------|-------|-------|-------|-----|--------------|-------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|
|             | % MO    | % A   | % L   | % R   |     |              |                                     |                                     |                                    |                                   |
| 1A-E        | 2.86    | 73.78 | 17.14 | 9.08  | 6.3 | 93.4         | 157.6850                            | 56.1008                             | 0.5490                             | 0.0359                            |
| 2A-E        | 3.75    | 73.47 | 13.04 | 13.49 | 7.0 | 267.0        | 494.3600                            | 146.5956                            | 0.2842                             | 0.0490                            |
| 3A-E        | 1.08    | 81.44 | 9.38  | 9.18  | 6.7 | 227.0        | 377.7100                            | 87.4132                             | 0.6415                             | 0.0511                            |
| 4A-E        | 2.15    | 88.77 | 5.06  | 6.17  | 7.0 | 334.0        | 524.3950                            | 133.7795                            | 0.4930                             | 0.1245                            |
| 5A-E        | 8.92    | 91.01 | 3.56  | 5.43  | 6.4 | 297.0        | 432.7200                            | 106.5386                            | 0.2086                             | 0.1296                            |
| 6A-E        | 2.78    | 84.58 | 8.09  | 7.33  | 7.3 | 237.0        | 416.6150                            | 64.4688                             | 0.0788                             | 0.0848                            |
| 7A-E        | 0.85    | 82.77 | 10.31 | 6.92  | 6.9 | 266.0        | 446.5200                            | 86.6492                             | 0.3186                             | 0.1469                            |
| 8A-E        | 2.19    | 85.99 | 7.22  | 6.79  | 6.6 | 126.3        | 165.0200                            | 60.8524                             | 0.5431                             | 0.0052                            |
| 9A-E        | 4.82    | 84.21 | 6.93  | 8.86  | 6.9 | 393.0        | 805.3300                            | 132.6937                            | 0.1577                             | 0.0490                            |
| 10A-E       | 1.40    | 84.47 | 8.72  | 6.81  | 6.6 | 116.4        | 143.5200                            | 32.0443                             | 0.1821                             | 0.0490                            |
| 1B-E        | 2.00    | 75.00 | 14.72 | 10.28 | 6.6 | 114.6        | 168.6850                            | 34.5503                             | 0.7444                             | 0.0324                            |
| 2B-E        | 1.15    | 60.06 | 14.76 | 25.18 | 6.9 | 56.0         | 104.5100                            | 22.9553                             | 0.6926                             | 0.0315                            |
| 3B-E        | 0.35    | 76.78 | 11.74 | 11.48 | 6.8 | 88.1         | 100.8450                            | 47.5194                             | 0.0000                             | 0.0000                            |
| 4B-E        | 0.93    | 89.01 | 5.22  | 5.77  | 6.8 | 84.4         | 113.6800                            | 31.0674                             | 0.6025                             | 0.0207                            |
| 5B-E        | 2.05    | 88.70 | 4.71  | 6.59  | 6.6 | 100.5        | 157.6850                            | 32.2306                             | 0.1506                             | 0.0180                            |
| 6B-E        | 1.59    | 79.14 | 11.93 | 8.93  | 7.5 | 85.5         | 141.1800                            | 25.8566                             | 0.5943                             | 0.0090                            |
| 7B-E        | 0.14    | 90.09 | 3.95  | 5.96  | 7.0 | 87.9         | 155.8500                            | 52.7404                             | 1.3423                             | 0.0289                            |
| 8B-E        | 0.06    | 73.83 | 14.36 | 11.81 | 6.6 | 96.6         | 119.1800                            | 53.3152                             | 0.5693                             | 0.0412                            |
| 9B-E        | 1.21    | 64.77 | 16.7  | 18.53 | 6.6 | 88.3         | 123.5900                            | 39.2694                             | 0.3436                             | 0.0979                            |
| 10B-E       | 0.36    | 85.10 | 8.59  | 6.31  | 7.0 | 136.9        | 181.5200                            | 54.5975                             | 0.1972                             | 0.0589                            |
| 1A-NE       | 1.59    | 87.94 | 6.23  | 5.83  | 6.9 | 252.0        | 394.6900                            | 79.6489                             | 0.1641                             | 0.1720                            |
| 2A-NE       | 0.91    | 83.64 | 8.2   | 8.16  | 7.1 | 222.0        | 318.9400                            | 86.3501                             | 0.1984                             | 0.0566                            |
| 3A-NE       | 1.33    | 84.80 | 9.48  | 5.72  | 7.5 | 219.0        | 326.9150                            | 123.7106                            | 0.3186                             | 0.0566                            |
| 4A-NE       | 2.10    | 85.40 | 8.57  | 6.01  | 6.8 | 129.5        | 198.0250                            | 58.7709                             | 0.1577                             | 0.1019                            |
| 5A-NE       | 2.54    | 88.72 | 6.18  | 5.1   | 6.2 | 218.0        | 392.3800                            | 72.5836                             | 0.1506                             | 0.0274                            |
| 6A-NE       | 3.86    | 88.84 | 4.74  | 6.42  | 6.7 | 159.7        | 300.7000                            | 43.6046                             | 0.2846                             | 0.0475                            |
| 7A-NE       | 3.96    | 83.51 | 9.67  | 6.83  | 6.7 | 310.0        | 539.0650                            | 150.2349                            | 1.0816                             | 0.0972                            |
| 8A-NE       | 1.63    | 84.23 | 9.64  | 6.13  | 6.5 | 232.0        | 286.0350                            | 121.0042                            | 0.0910                             | 0.5417                            |
| 9A-NE       | 3.10    | 90.22 | 4.59  | 5.18  | 6.8 | 283.0        | 462.4650                            | 87.9968                             | 0.0978                             | 0.0363                            |
| 10A-NE      | 1.54    | 89.40 | 4.67  | 5.92  | 6.9 | 140.0        | 161.3500                            | 45.4412                             | 0.1506                             | 0.0866                            |

| No. muestra | TEXTURA |       |       |      |     | pH    | C.E<br>μS/cm | Ca <sup>2+</sup><br>meq/100 g Suelo | Mg <sup>2+</sup><br>meq/100 g Suelo | Na <sup>+</sup><br>meq/100 g Suelo | K <sup>+</sup><br>meq/100 g Suelo |
|-------------|---------|-------|-------|------|-----|-------|--------------|-------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|
|             | % MO    | % A   | % L   | % R  |     |       |              |                                     |                                     |                                    |                                   |
| 1B-NE       | 0.42    | 88.67 | 5.85  | 5.46 | 6.4 | 71.3  | 91.6750      | 21.7955                             | 0.1821                              | 0.0283                             |                                   |
| 2B-NE       | 0.46    | 84.74 | 7.72  | 7.55 | 6.7 | 67.4  | 79.7350      | 52.1598                             | 0.2534                              | 0.1019                             |                                   |
| 3B-NE       | 1.09    | 83.23 | 10.55 | 6.21 | 6.7 | 64.4  | 103.6550     | 41.9523                             | 0.1641                              | 0.1979                             |                                   |
| 4B-NE       | 0.83    | 80.73 | 11.59 | 7.69 | 6.6 | 76.4  | 106.3450     | 38.4822                             | 0.5703                              | 0.0748                             |                                   |
| 5B-NE       | 0.85    | 87.57 | 6.2   | 6.24 | 6.7 | 106.9 | 190.6900     | 26.2104                             | 0.3436                              | 0.1233                             |                                   |
| 6B-NE       | 2.19    | 81.17 | 11.54 | 7.28 | 6.6 | 125.3 | 177.8100     | 43.8513                             | 0.0847                              | 0.0137                             |                                   |
| 7B-NE       | 2.30    | 84.91 | 9.3   | 5.79 | 6.8 | 104.0 | 148.5150     | 35.8224                             | 0.0788                              | 0.0283                             |                                   |
| 8B-NE       | 0.65    | 87.08 | 6.13  | 6.79 | 6.3 | 271.0 | 333.7050     | 135.3780                            | 0.1204                              | 0.0748                             |                                   |
| 9B-NE       | 1.63    | 88.48 | 5.04  | 6.48 | 6.6 | 113.2 | 177.4100     | 47.7483                             | 0.1204                              | 0.0490                             |                                   |
| 10B-NE      | 0.31    | 87.59 | 6.19  | 6.22 | 6.4 | 94.0  | 128.3450     | 42.3086                             | 0.5916                              | 0.0340                             |                                   |

| No. muestra | Fe              | CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> | HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | NO <sub>2</sub> | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | % N    | % N        |
|-------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------|------------------------------|--------|------------|
|             | meq/100 g Suelo |                               | meq/100 g Suelo               | meq/100 g Suelo | meq/100 g Suelo              | total  | asimilable |
| 1A-E        | 189.4066        | ---                           | 172.7521                      | -----           | 0.4626                       | 0.0140 | 0.0014     |
| 2A-E        | 84.5269         | ---                           | 626.0125                      | -----           | 0.5666                       | 0.1900 | 0.0019     |
| 3A-E        | 95.5851         | ---                           | 468.6542                      | -----           | 0.4819                       | 0.0540 | 0.0005     |
| 4A-E        | 28.3723         | ---                           | 663.6417                      | -----           | 0.7294                       | 0.1080 | 0.0011     |
| 5A-E        | 22.3248         | ---                           | 552.4646                      | -----           | 0.3483                       | 0.4460 | 0.0045     |
| 6A-E        | 78.3067         | ---                           | 576.7525                      | -----           | 0.4907                       | 0.1380 | 0.0014     |
| 7A-E        | 134.8070        | ---                           | 543.9125                      | 0.1086          | 0.4878                       | 0.0430 | 0.0004     |
| 8A-E        | 52.7348         | ---                           | 153.9375                      | -----           | 0.3589                       | 0.1090 | 0.0011     |
| 9A-E        | 41.1583         | ---                           | 810.7375                      | 1.1496          | 0.4599                       | 0.2410 | 0.0024     |
| 10A-E       | 47.3785         | ---                           | 198.4083                      | -----           | 0.5861                       | 0.0700 | 0.0007     |
| 1B-E        | 190.7888        | ---                           | 191.5667                      | -----           | 0.5134                       | 0.1000 | 0.0010     |
| 2B-E        | 159.8606        | ---                           | 129.9917                      | -----           | 0.3731                       | 0.0570 | 0.0006     |
| 3B-E        | 152.6037        | ---                           | 94.0729                       | -----           | 0.3480                       | 0.0170 | 0.0002     |
| 4B-E        | 74.3327         | ---                           | 157.3583                      | -----           | 0.2864                       | 0.0460 | 0.0005     |
| 5B-E        | 156.2321        | ---                           | 167.6208                      | -----           | 0.4013                       | 0.1020 | 0.0010     |
| 6B-E        | 171.2643        | ---                           | 171.0417                      | -----           | 0.3260                       | 0.0800 | 0.0008     |
| 7B-E        | 243.4878        | ---                           | 198.4083                      | -----           | 0.3336                       | 0.0070 | 0.0001     |
| 8B-E        | 151.3942        | ---                           | 111.1771                      | -----           | 0.4009                       | 0.0320 | 0.0003     |
| 9B-E        | 46.6873         | ---                           | 205.2500                      | 0.0964          | 0.6687                       | 1.2100 | 0.0006     |
| 10B-E       | 180.0763        | ---                           | 169.3313                      | -----           | 0.5088                       | 0.0180 | 0.0002     |

| No. muestra | Fe              | CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> | HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | %N     | %N         |
|-------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|------------------------------|------------------------------|--------|------------|
|             | meq/100 g Suelo |                               | meq/100 g Suelo               | meq/100 g Suelo              | meq/100 g Suelo              | total  | asimilable |
| 1A-NE       | 63.7929         | ----                          | 519.9667                      | -----                        | 0.6443                       | 0.0800 | 0.0008     |
| 2A-NE       | 149.4936        | ----                          | 492.6000                      | -----                        | 0.5260                       | 0.0460 | 0.0005     |
| 3A-NE       | 128.4140        | ----                          | 489.1792                      | -----                        | 0.7118                       | 0.0670 | 0.0007     |
| 4A-NE       | 15.4135         | ----                          | 273.6667                      | -----                        | 0.4928                       | 0.1050 | 0.0011     |
| 5A-NE       | 28.7128         | ----                          | 499.4417                      | -----                        | 0.3961                       | 0.1270 | 0.0013     |
| 6A-NE       | 71.7410         | ----                          | 306.1646                      | -----                        | 0.4576                       | 0.1930 | 0.0019     |
| 7A-NE       | 16.7958         | ----                          | 691.0083                      | -----                        | 0.5664                       | 0.1980 | 0.0020     |
| 8A-NE       | 19.7331         | ----                          | 475.4958                      | 0.0388                       | 0.5571                       | 0.0820 | 0.0008     |
| 9A-NE       | 43.2903         | ----                          | 540.4917                      | -----                        | 1.0064                       | 0.1550 | 0.0016     |
| 10A-NE      | 65.0024         | ----                          | 249.7208                      | -----                        | 0.3843                       | 0.0770 | 0.0008     |
| 1B-NE       | 19.5603         | ----                          | 106.0458                      | -----                        | 0.5083                       | 0.0210 | 0.0002     |
| 2B-NE       | 135.8437        | ----                          | 133.4125                      | -----                        | 0.5676                       | 0.0230 | 0.0002     |
| 3B-NE       | 65.3480         | ----                          | 208.6708                      | 0.0224                       | 0.5622                       | 0.0550 | 0.0006     |
| 4B-NE       | 19.9059         | ----                          | 133.4125                      | -----                        | 0.5483                       | 0.0420 | 0.0004     |
| 5B-NE       | 19.5603         | ----                          | 194.9875                      | -----                        | 0.3644                       | 0.0430 | 0.0004     |
| 6B-NE       | 150.6835        | ----                          | 232.6167                      | -----                        | 0.8758                       | 0.1100 | 0.0011     |
| 7B-NE       | 38.2209         | ----                          | 164.2000                      | -----                        | 0.5395                       | 0.1150 | 0.0011     |
| 8B-NE       | 9.0205          | ----                          | 475.4958                      | -----                        | 0.5154                       | 0.0320 | 0.0003     |
| 9B-NE       | 107.1616        | ----                          | 239.4583                      | -----                        | 0.6771                       | 0.0810 | 0.0008     |
| 10B-NE      | 45.8234         | ----                          | 152.2271                      | 0.0193                       | 0.4573                       | 0.0160 | 0.0002     |

## ANEXO 2

Descripción de los perfiles de suelo y resultados de los análisis físico-químicos de las muestras colectadas. La designación de los horizontes se hizo de acuerdo a la utilizada por el INEGI para la elaboración de la antigua Carta Edafológica (no publicada)

### Area San Antonio de la Sierra

Sitio "El Mautal"

Ubicación del punto UTM - 12R 608232 / 2619911

Clasificación: Regosol éutrico

Horizonte A1

Profundidad 0 – 8 cm

|                               |  |
|-------------------------------|--|
| Separación entre horizontes   | Abrupta e irregular  |
| Reacción al HCl 10%           | Nula   |
| Estructura de los agregados   | Tipo: bloques subangulares; clase: finos; grado de desarrollo: débil                   |
| Porosidad                     | Fina y abundante   |
| Color                         | 10 YR 5/4 (pardo amarillento) en seco y 10 YR 4/4 (pardo amarillento oscuro) en húmedo |
| Consistencia de los agregados | Blanda en seco y muy friable en húmedo   |
| Adhesividad y plasticidad     | Ligeras  |
| Textura                       | Areno migajosa   |
| Esqueleto                     | Gravas angulares de cuarzo escasas   |
| Raíces                        | Finas abundantes, medias y gruesas, escasas.   |

Denominación del horizonte de diagnóstico: Ocrico

Horizonte C1

Profundidad 8 – 29 cm

|                               |  |
|-------------------------------|--|
| Separación entre horizontes   | Abrupta y plana  |
| Reacción al HCl 10%           | Nula   |
| Estructura de los agregados   | Tipo: bloques angulares; clase: finos; grado de desarrollo: fuerte |
| Color                         | 7.5 YR 6/4 (pardo claro) en seco y 7.5 YR 5/4 (pardo) en húmedo    |
| Consistencia de los agregados | Ligeramente dura en seco y firme en húmedo                         |
| Adhesividad y plasticidad     | Moderadas  |
| Textura                       | Migajón arenoso  |
| Esqueleto                     | Gravas angulares abundantes  |
| Raíces                        | Finas y medias escasas, gruesas frecuentes                         |

Horizonte C2

Profundidad 29 – 47 cm

|                               |   |
|-------------------------------|---|
| Reacción al HCl 10%           | Nula  |
| Estructura de los agregados   | Tipo: bloques angulares; clase: finos; grado de desarrollo: moderado      |
| Color                         | 7.5 YR 5/6 (pardo intenso) en seco y 7.5 YR 4/6 (pardo intenso) en húmedo |
| Consistencia de los agregados | Muy dura en seco y extremadamente firme en húmedo                         |
| Adhesividad y plasticidad     | Moderadas   |

|           |  |
|-----------|--|
| Textura   | Migajón arcillo arenoso                    |
| Esqueleto | Gravas angulares dominantes                |
| Raíces    | Finas y medias escasas, gruesas frecuentes |

---

Sitio "Los Llanos – abajo"

Ubicación del punto UTM - 12R 606838 / 2620293

Clasificación: Xerosol háplico

Horizonte A1

Profundidad 0 – 20 cm

|                               |   |
|-------------------------------|---|
| Separación entre horizontes   | Clara e irregular   |
| Reacción al HCl 10%           | Nula  |
| Estructura de los agregados   | Tipo: bloques subangulares; clase: medios; grado de desarrollo: moderado              |
| Porosidad                     | Fina y abundante  |
| Color                         | 10 YR 6/4 (pardo amarillento claro) en seco y 10 YR 5/4 (pardo amarillento) en húmedo |
| Consistencia de los agregados | Blanda en seco y muy friable en húmedo  |
| Adhesividad y plasticidad     | Moderadas   |
| Textura                       | Franca  |
| Esqueleto                     | Gravas angulares y subangulares escasas   |
| Raíces                        | Finas abundantes, medias escasas  |

Denominación del horizonte de diagnóstico: Ocrico

Horizonte B2

Profundidad 20 – 32 cm

|                               |   |
|-------------------------------|---|
| Separación entre horizontes   | Abrupta e irregular   |
| Reacción al HCl 10%           | Nula  |
| Estructura de los agregados   | Tipo: bloques angulares; clase: finos; grado de desarrollo: moderado            |
| Porosidad                     | Fina y abundante  |
| Color                         | 10 YR 6.5/6 (pardo muy pálido) en seco y 7.5 YR 6/6 (amarillo rojizo) en húmedo |
| Consistencia de los agregados | Dura en seco y muy friable en húmedo  |
| Adhesividad y plasticidad     | Moderadas   |
| Textura                       | Arcillo arenosa   |
| Esqueleto                     | Gravas subangulares abundantes; gujarros angulares escasos                      |
| Raíces                        | Finas, medias y gruesas, escasas  |

Denominación del horizonte de diagnóstico: Cámbico

Horizonte C1

Profundidad 32 – 52 cm

Roca intemperizada

---

Sitio "Los Llanos – arriba"

Ubicación del punto UTM - 12R 606784 / 2620375

Clasificación: Regosol éutrico

Horizonte A1  
Profundidad 0 – 9/13 cm

|                               |  |
|-------------------------------|--|
| Separación entre horizontes   | Abrupta e irregular  |
| Reacción al HCl 10%           | Nula   |
| Estructura de los agregados   | Tipo: bloques angulares; clase: gruesos; grado de desarrollo: moderado |
| Porosidad                     | Fina y abundante   |
| Color                         | 10 YR 5/4 (pardo amarillento) en seco y 7.5 YR 4/3 (pardo) en húmedo   |
| Consistencia de los agregados | Ligeramente dura en seco y friable en húmedo                           |
| Adhesividad y plasticidad     | Moderada   |
| Textura                       | Migajón arcillo arenoso  |
| Esqueleto                     | Gravas y guijarros angulares abundantes                                |
| Raíces                        | Finas abundantes, medias y gruesas escasas                             |

Denominación del horizonte de diagnóstico: Ocrico

---

Sitio "Camino Viejo"  
Ubicación del punto UTM - 12R 608659 / 2618499  
Clasificación: Xerosol háplico

Horizonte A1  
Profundidad 0-14 cm

|                               |   |
|-------------------------------|---|
| Separación entre horizontes   | Clara e irregular   |
| Reacción al HCl 10%           | Nula  |
| Estructura de los agregados   | Tipo: bloques subangulares; clase: finos; grado de desarrollo: moderado             |
| Porosidad                     | Fina y abundante  |
| Color                         | 10 YR 5.5/3 (pardo-pardo pálido) en seco y 10 YR 4/3 (pardo-pardo oscuro) en húmedo |
| Consistencia de los agregados | Ligeramente dura en seco y friable en húmedo  |
| Adhesividad y plasticidad     | Ligeras   |
| Textura                       | Migajón arcillo arenoso   |
| Raíces                        | Finas abundantes, medias frecuentes   |

Denominación del horizonte de diagnóstico: Ocrico

Horizonte B2  
Profundidad 14 – 19 cm

|                               |   |
|-------------------------------|---|
| Separación entre horizontes   | Gradual e irregular   |
| Reacción al HCl 10%           | Nula  |
| Estructura de los agregados   | Tipo: bloques angulares; clase: finos; grado de desarrollo: moderado                        |
| Porosidad                     | Fina y abundante  |
| Color                         | 10 YR 6/3.5 (pardo pálido- pardo amarillento claro) en seco y 10 YR 4.5/3 (pardo) en húmedo |
| Consistencia de los agregados | Suelta en seco y muy friable en húmedo  |
| Adhesividad y plasticidad     | Nulas   |
| Textura                       | Migajón arcillo arenoso   |
| Raíces                        | Finas abundantes, medias frecuentes, gruesas escasas  |

Denominación del horizonte de diagnóstico: Cámbico

---

### Area El Crucero

Sitio "La Cañada"

Ubicación del punto UTM - 12R 593565 / 2610964

Clasificación: Xerosol háplico

Horizonte A11

Profundidad 0 – 9 cm

|                               |   |
|-------------------------------|---|
| Separación entre horizontes   | Clara e irregular                           |
| Reacción al HCl 10%           | Nula  |
| Estructura de los agregados   | Sin estructura                              |
| Color                         | 10 YR 4/2 (pardo grisáceo oscuro) en húmedo |
| Consistencia de los agregados | Suelta en seco y en húmedo                  |
| Adhesividad y plasticidad     | Nulas                                       |
| Textura                       | Migajón arenoso                             |
| Raíces                        | Finas abundantes                            |

Horizonte A12

Profundidad 9 – 22 cm

|                               |   |
|-------------------------------|---|
| Separación entre horizontes   | Clara e irregular   |
| Reacción al HCl 10%           | Nula  |
| Estructura de los agregados   | Tipo: bloques subangulares; clase: gruesos; grado de desarrollo: moderado |
| Porosidad                     | Fina y abundante  |
| Color                         | 10 YR 4/3 (pardo-pardo oscuro) en húmedo                                  |
| Consistencia de los agregados | Muy friable en húmedo   |
| Adhesividad y plasticidad     | Ligeras   |
| Textura                       | Migajón arenoso   |
| Raíces                        | Finas abundantes, medias escasas  |

Denominación del horizonte de diagnóstico: Ocrico

Horizonte B2

Profundidad 22 – 52/63 cm

|                               |   |
|-------------------------------|---|
| Separación entre horizontes   | Clara y ondulada  |
| Reacción al HCl 10%           | Nula  |
| Estructura de los agregados   | Tipo: bloques subangulares; clase: muy gruesos; grado de desarrollo: moderado |
| Porosidad                     | Fina y abundante  |
| Color                         | 10 YR 6/4 (pardo amarillento claro) en húmedo                                 |
| Consistencia de los agregados | Friable en húmedo   |
| Adhesividad y plasticidad     | Moderadas   |
| Textura                       | Migajón arcillo arenoso   |
| Raíces                        | Gruesas, escasas  |

Denominación del horizonte de diagnóstico: Cámbico

Horizonte C1  
Profundidad 63 – 83 cm  
Roca intemperizada

---

Sitio "Más cercano - abajo"  
Ubicación del punto UTM - 12R 594034 / 2610728  
Clasificación: Xerosol háplico

Horizonte A1  
Profundidad 0 – 5 cm

|                               |  |
|-------------------------------|--|
| Separación entre horizontes   | Clara y plana  |
| Reacción al HCl 10%           | Nula   |
| Estructura de los agregados   | Tipo: bloques subangulares; clase: gruesos; grado de desarrollo: moderado              |
| Porosidad                     | Fina y abundante   |
| Color                         | 10 YR 5/4 (pardo amarillento) en seco y 10 YR 4/4 (pardo amarillento oscuro) en húmedo |
| Consistencia de los agregados | Blanda en seco y muy friable en húmedo   |
| Adhesividad y plasticidad     | Nulas  |
| Textura                       | Areno migajosa   |
| Raíces                        | Finas frecuentes, medias escasas   |

Denominación del horizonte de diagnóstico: Ocrico

Horizonte B2  
Profundidad 5 – 12/16 cm

|                               |   |
|-------------------------------|---|
| Separación entre horizontes   | Clara y ondulada  |
| Reacción al HCl 10%           | Nula  |
| Estructura de los agregados   | Tipo: bloques subangulares; clase: muy gruesos; grado de desarrollo: fuerte           |
| Porosidad                     | Fina y abundante  |
| Color                         | 10 YR 6/4 (pardo amarillento claro) en seco y 10 YR 5/4 (pardo amarillento) en húmedo |
| Consistencia de los agregados | Dura en seco y friable en húmedo  |
| Adhesividad y plasticidad     | Ligeras   |
| Textura                       | Areno migajosa  |
| Raíces                        | Medias frecuentes   |

Denominación del horizonte de diagnóstico: Cámbico

Horizonte C1 (roca bastante intemperizada - saprolita)  
Profundidad 12/16 – 30/34

|                             |  |
|-----------------------------|--|
| Separación entre horizontes | Abrupta e irregular  |
| Reacción al HCl 10%         | Nula   |
| Estructura de los agregados | Tipo: bloques angulares; clase: muy gruesos; grado de desarrollo: fuerte |
| Porosidad                   | Fina y abundante   |

|                               |   |
|-------------------------------|---|
| Color                         | 10 YR 6.5/6 (pardo muy pálido) en seco y 7.5 YR 5/6 (pardo intenso) en húmedo |
| Consistencia de los agregados | Extremadamente dura en seco y muy friable en húmedo                           |
| Adhesividad y plasticidad     | Nulas   |
| Textura                       | Arena   |
| Raíces                        | Medias frecuentes, gruesas escasas  |

---

Sitio "Más cercano - arriba"

Ubicación del punto UTM - 12R 594109 / 2610722

Clasificación: Xerosol háplico

Horizonte A1

Profundidad 0 – 3 cm

|                               |  |
|-------------------------------|--|
| Separación entre horizontes   | Clara e irregular  |
| Reacción al HCl 10%           | Nula   |
| Estructura de los agregados   | Tipo: migajosa; clase: finos; ; grado de desarrollo: débil |
| Porosidad                     | Fina y abundante   |
| Color                         | 10 YR 4/2 (pardo grisáceo oscuro) en húmedo                |
| Consistencia de los agregados | Suelta en seco y en húmedo                                 |
| Adhesividad y plasticidad     | Nulas  |
| Textura                       | Areno migajosa   |
| Raíces                        | Finas abundantes   |

Denominación del horizonte de diagnóstico: Ocrico

Horizonte B21

Profundidad 3 – 28 cm

|                               |   |
|-------------------------------|---|
| Separación entre horizontes   | Clara e irregular   |
| Reacción al HCl 10%           | Nula  |
| Estructura de los agregados   | Tipo: bloques subangulares; clase: gruesos; grado de desarrollo: moderado |
| Porosidad                     | Fina y abundante  |
| Color                         | 10 YR 5/3 (pardo) en húmedo   |
| Consistencia de los agregados | Ligeramente dura en seco y muy friable en húmedo                          |
| Adhesividad y plasticidad     | Ligeras   |
| Textura                       | Migajón arenoso   |
| Raíces                        | Finas abundantes, medias y gruesas frecuentes                             |

Horizonte B22

Profundidad 28 – 40/52 cm

|                               |  |
|-------------------------------|--|
| Separación entre horizontes   | Clara y ondulada   |
| Reacción al HCl 10%           | Nula   |
| Estructura de los agregados   | Tipo: bloques subangulares; clase: medios; grado de desarrollo: moderado |
| Porosidad                     | Fina y abundante   |
| Facetas de fricción / presión |  |
| Color                         | 10 YR 5/3 (pardo) en húmedo  |
| Consistencia de los agregados | Ligeramente dura en seco y muy friable en húmedo                         |
| Adhesividad y plasticidad     | Moderadas  |

|         |   |
|---------|---|
| Textura | Areno migajosa  |
| Raíces  | Finas abundantes, medias frecuentes y gruesas escasas |

Denominación del horizonte de diagnóstico: Cámbico

Horizonte C1  
Profundidad 40/52 – 82 cm

|                               |   |
|-------------------------------|---|
| Separación entre horizontes   | Abrupta y plana   |
| Reacción al HCl 10%           | Nula  |
| Estructura de los agregados   | Tipo: bloques angulares; clase: medios; grado de desarrollo: moderado |
| Porosidad                     | Fina y abundante  |
| Color                         | 10 YR 6/4 (pardo amarillento claro) en húmedo                         |
| Consistencia de los agregados | Extremadamente dura en seco y muy friable en húmedo                   |
| Adhesividad y plasticidad     | Moderadas   |
| Textura                       | Migajón arenoso   |
| Esqueleto                     | Gravas angulares muy escasas; guijarros subredondeados escasos        |

---

### Area Cañada de Los Naranjos

Sitio "Los Naranjos"  
Ubicación del punto UTM - 12R 614121 / 2569288  
Clasificación: Regosol éutrico

Horizonte A11  
Profundidad 0 – 3 cm

|                               |   |
|-------------------------------|---|
| Separación entre horizontes   | Clara y plana   |
| Reacción al HCl 10%           | Nula  |
| Estructura de los agregados   | Tipo: Migajosa; clase: finos;   |
| Porosidad                     | Fina y abundante  |
| Color                         | 10 YR 4/2 (pardo grisáceo oscuro) en seco y 10 YR 3/2 (pardo grisáceo muy oscuro) en húmedo |
| Consistencia de los agregados | Suelta en seco y en húmedo  |
| Adhesividad y plasticidad     | Nulas   |
| Textura                       | Areno migajosa  |
| Esqueleto                     | Gravas subredondeadas frecuentes  |
| Raíces                        | Finas abundantes  |

Horizonte A12  
Profundidad 3 - 70 cm

|                               |  |
|-------------------------------|--|
| Separación entre horizontes   | Clara e irregular  |
| Reacción al HCl 10%           | Nula   |
| Estructura de los agregados   | Sin estructura   |
| Porosidad                     | Fina y abundante   |
| Color                         | 10 YR 5/3 (pardo) en húmedo y 10 YR 4/3 (pardo-pardo oscuro) en seco |
| Consistencia de los agregados | Suelta en seco y en húmedo   |
| Adhesividad y plasticidad     | Nulas  |
| Textura                       | Migajón arenoso  |

Esqueleto Gravas subredondeadas abundantes  
 Raíces Finas abundantes, medias frecuentes, gruesas escasas  
 Denominación del horizonte de diagnóstico: Ocrico

Horizonte C1  
 Profundidad 70 - 100 cm

Reacción al HCl 10% Nula  
 Estructura de los agregados Sin estructura  
 Porosidad Fina y abundante  
 Color 10 YR 6/3 (pardo pálido) en seco y 10 YR 5/4 (pardo amarillento) en húmedo  
 Consistencia de los agregados Suelta en seco y en húmedo  
 Adhesividad y plasticidad Nulas  
 Textura Arena  
 Esqueleto Gravas subredondeadas dominantes

Resultados de los análisis físico-químicos de las muestras de los perfiles descritos

**Area San Antonio de la Sierra**

| Sitio             | Horiz | Prof     | TEXTURA |     |     | MO %  | pH 1:1 | C.E $\mu$ S/cm | Ca <sup>2+</sup> meq/100 g suelo | Mg <sup>2+</sup> meq/100 g suelo | Na <sup>+</sup> meq/100 g suelo |
|-------------------|-------|----------|---------|-----|-----|-------|--------|----------------|----------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|
|                   |       |          | % A     | % L | % R |       |        |                |                                  |                                  |                                 |
| El Mautal         | A1    | 0-8      | 82      | 11  | 7   | 10.84 | 5.9    | 264.0          | 506.3200                         | 172.9376                         | 13.5426                         |
| El Mautal         | C1    | 8-29     | 70      | 11  | 19  | 2.30  | 6.0    | 62.5           | 106.3450                         | 90.6238                          | 57.7463                         |
| El Mautal         | C2    | 29-47    | 72      | 6   | 22  | 2.02  | 6.1    | 45.2           | 146.6850                         | 98.508                           | 42.9328                         |
| Los Llanos-abajo  | A1    | 0-20     | 43      | 48  | 9   | 1.17  | 6.7    | 89.6           | 53.1700                          | 15.7649                          | 30.6553                         |
| Los Llanos-abajo  | B2    | 20-32    | 52      | 12  | 36  | 0.84  | 6.5    | 53.0           | 60.505                           | 17.0404                          | 99.6606                         |
| Los Llanos-arriba | C1    | 0 - 9/13 | 70      | 3   | 27  | 3.32  | 5.9    | 84.0           | 267.1150                         | 68.8678                          | 12.2980                         |
| Camino Viejo      | A1    | 0-14     | 55      | 25  | 20  | 9.00  | 6.3    | 213.0          | 207.3100                         | 80.4106                          | 4.8301                          |
| Camino Viejo      | B2    | 14-19    | 62      | 15  | 23  | 3.50  | 6.5    | 87.1           | 75.7450                          | 59.6843                          | 25.6729                         |

| Sitio             | Horiz | K <sup>+</sup>  | Fe <sup>3+</sup> | CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> | HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> |
|-------------------|-------|-----------------|------------------|-------------------------------|-------------------------------|------------------------------|------------------------------|
|                   |       | meq/100 g suelo | meq/100 g suelo  |                               | meq/100 g suelo               | meq/100 g suelo              | meq/100 g suelo              |
| El Mautal         | A1    | 9.5746          | 5.7742           | -----                         | 667.0625                      | 1.8820                       | 0.4699                       |
| El Mautal         | C1    | 6.1495          | 1143.696         | -----                         | 136.8333                      | -----                        | 0.4009                       |
| El Mautal         | C2    | 10.2787         | 1741.8730        | -----                         | 109.4667                      | -----                        | 0.2999                       |
| Los Llanos-abajo  | A1    | 2.0316          | 68.2852          | -----                         | 119.7292                      | -----                        | 0.3101                       |
| Los Llanos-abajo  | B2    | 1.6425          | 137.5715         | -----                         | 99.2041                       | 0.0299                       | 0.2762                       |
| Los Llanos-arriba | C1    | 0.7331          | 11.2155          | -----                         | 150.5167                      | -----                        | -----                        |
| Camino Viejo      | A1    | 21.0668         | 1.6217           | -----                         | 424.1833                      | -----                        | 1.3653                       |
| Camino Viejo      | B2    | 13.4281         | 111.4812         | -----                         | 222.3542                      | -----                        | 0.9491                       |

**Area El Crucero**

| Sitio              | Horiz | Prof        | TEXTURA |     |     | % MO | pH  | C.E   | Ca <sup>2+</sup> | Mg <sup>2+</sup> | Na <sup>+</sup> |
|--------------------|-------|-------------|---------|-----|-----|------|-----|-------|------------------|------------------|-----------------|
|                    |       |             | % A     | % L | % R |      |     |       |                  |                  |                 |
| La Cañada          | A12   | 0-9         | 60      | 30  | 10  | 1.60 | 6.4 | 80.8  | 55.0050          | 17.3873          | 64.4529         |
| La Cañada          | A13   | 9-22        | 55      | 40  | 5   | 0.39 | 6.5 | 34.2  | 55.8150          | 20.4395          | 38.3206         |
| La Cañada          | B2    | 22-52/63    | 55      | 25  | 20  | 0.55 | 7.0 | 46.8  | 75.7450          | 42.2144          | 49.6167         |
| La Cañada          | C1    | 63-83       | 75      | 10  | 15  | 0.32 | 6.5 | 78.1  | 95.3450          | 68.7229          | 47.1595         |
| Más cercano-abajo  | A11   | 0-5         | 78      | 9   | 13  | 2.34 | 6.4 | 113.6 | 150.35           | 77.4200          | 89.7885         |
| Más cercano-abajo  | A12   | 5-12/16     | 78      | 19  | 3   | 0.16 | 6.5 | 61.5  | 91.6750          | 55.0498          | 93.0893         |
| Más cercano-abajo  | C1    | 12/16-30/34 | 91      | 5   | 4   | 0.00 | 6.6 | 35.2  | 55.0050          | 27.8157          | 39.5917         |
| Más cercano-arriba | A1    | 0-3         | 84      | 10  | 6   | 0.08 | 5.8 | 265.0 | 163.4550         | 75.8311          | 42.9227         |
| Más cercano-arriba | B21   | 3-28        | 77      | 14  | 9   | 0.62 | 5.7 | 41.7  | 38.5000          | 6.4930           | 45.7548         |
| Más cercano-arriba | B22   | 28-40/52    | 70      | 29  | 1   | 5.97 | 7.2 | 53.6  | 49.8300          | 56.1841          | 6.1094          |
| Más cercano-arriba | C1    | 40/52-82    | 72      | 11  | 17  | 0.19 | 6.5 | 143.1 | 219.2700         | 78.8009          | 4.1041          |

| Sitio              | Horiz | K <sup>+</sup>  | Fe <sup>3+</sup> | CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> | HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> |
|--------------------|-------|-----------------|------------------|-------------------------------|-------------------------------|------------------------------|------------------------------|
|                    |       | meq/100 g suelo | meq/100 g suelo  |                               | meq/100 g suelo               | meq/100 g suelo              | meq/100 g suelo              |
| La Cañada          | A12   | 6.7302          | 15.5862          | -----                         | 75.2583                       | -----                        | 0.5072                       |
| La Cañada          | A13   | 4.9107          | 37.5298          | -----                         | 164.2000                      | 0.3242                       | 0.3478                       |
| La Cañada          | B2    | 5.7705          | 80.8984          | -----                         | 150.5167                      | -----                        | 0.4441                       |
| La Cañada          | C1    | 8.8228          | 202.5381         | -----                         | 212.0917                      | 0.0661                       | 0.4225                       |
| Más cercano-abajo  | A11   | 6.1605          | 196.7339         | -----                         | 242.8792                      | -----                        | 0.4128                       |
| Más cercano-abajo  | A12   | 6.3842          | 458.8477         | -----                         | 116.3083                      | -----                        | 0.3623                       |
| Más cercano-abajo  | C1    | 5.7424          | 221.7171         | -----                         | 102.6250                      | -----                        | 0.3273                       |
| Más cercano-arriba | A1    | 50.3768         | 20.7697          | -----                         | 335.2417                      | -----                        | 1.3620                       |
| Más cercano-arriba | B21   | 4.7708          | 35.4564          | -----                         | 88.9416                       | -----                        | 0.3658                       |
| Más cercano-arriba | B22   | 3.3514          | 46.5836          | -----                         | 147.0958                      | -----                        | 0.8975                       |
| Más cercano-arriba | C1    | 2.8453          | 45.8677          | -----                         | 277.0875                      | -----                        | 0.0478                       |

**Area Cañada de Los Naranjos**

| Sitio        | Horiz | Prof   | TEXTURA |     |     | % MO  | pH  | C.E   | Ca <sup>2+</sup> | Mg <sup>2+</sup> | Na <sup>+</sup> |
|--------------|-------|--------|---------|-----|-----|-------|-----|-------|------------------|------------------|-----------------|
|              |       |        | % A     | % L | % R |       |     |       |                  |                  |                 |
| Los Naranjos | A11   | 0-3    | 84      | 14  | 2   | 12.60 | 6.3 | 297.0 | 534.2300         | 123.7599         | 80.8338         |
| Los Naranjos | A12   | 3-70   | 82      | 8   | 10  | 1.13  | 6.4 | 39.7  | 34.8350          | 20.3975          | 74.9122         |
| Los Naranjos | C1    | 70-100 | 90      | 8   | 2   | 0.56  | 6.6 | 28.9  | 45.8350          | 24.9178          | 47.4815         |

| Sitio        | Horiz | K <sup>+</sup>  | Fe <sup>3+</sup> | CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> | HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> |
|--------------|-------|-----------------|------------------|-------------------------------|-------------------------------|------------------------------|------------------------------|
|              |       | meq/100 g suelo | meq/100 g suelo  |                               | meq/100 g suelo               | meq/100 g suelo              | meq/100 g suelo              |
| Los Naranjos | A11   | 18.1067         | 17.8324          | -----                         | 615.7500                      | -----                        | 0.8816                       |
| Los Naranjos | A12   | 1.3318          | 10.0572          | -----                         | 88.9416                       | -----                        | 0.3358                       |
| Los Naranjos | C1    | 0.3443          | 49.7974          | -----                         | 106.0458                      | -----                        | 0.2835                       |

### ANEXO 3

Resultados de los levantamientos de vegetación realizados en 400 m<sup>2</sup>, durante los meses de septiembre – octubre de 1997

#### AREA SAN ANTONIO DE LA SIERRA

| ZONA CON POCA PERTURBACION |   |            |                          |            | ZONA EROSIONADA |   |            |                          |            |
|----------------------------|---|------------|--------------------------|------------|-----------------|---|------------|--------------------------|------------|
| Nombre común               | Especie   | Frecuencia | Cob. Tot. m <sup>2</sup> | Porcentaje | Nombre común    | Especie   | Frecuencia | Cob. Tot. m <sup>2</sup> | Porcentaje |
| Lomboy rojo                | <i>Jatropha vernicosa</i> Brandegee   | 37         | 102.457                  | 19.612     | Vinorama        | <i>Acacia farnesiana</i> (L.) Willd.                | 1          | 16.242                   | 48.695     |
| Chiococa                   | <i>Chiococca pubescens</i> Humb. & Bonpl.<br>ex Roem. & Schult.               | 17         | 87.422                   | 16.734     |                 |   | 13         | 6.966                    | 20.885     |
| Torote                     | <i>Bursera microphylla</i> A. Gray  | 12         | 69.672                   | 13.336     | Celosa          | <i>Mimosa xanti</i>                                 |            | 6.436                    | 19.296     |
| Mauto                      | <i>Lysiloma divaricata</i> Hook & Jackson                                     | 2          | 63.099                   | 12.078     | Mauto           | <i>Lysiloma divaricata</i>                          | 9          | 1.060                    | 3.178      |
| Palo de arco               | <i>Tecoma stans</i> (L.) Juss. ex Kunth                                       | 13         | 56.603                   | 10.834     | Pitaya dulce    | <i>Stenocereus thurberi</i> (Engelm.) Buxb.         | 6          | 1.009                    | 3.025      |
| Croton                     | <i>Croton boregensis</i> M.E. Jones   | 42         | 27.653                   | 5.293      | Lomboy rojo     | <i>Jatropha vernicosa</i>                           | 10         | 0.687                    | 2.059      |
| Cacachila                  | <i>Karwinskia humboldtiana</i> (Willd. ex<br>Roem. & Schult.) Zucc.           | 4          | 24.096                   | 4.612      | Nopal           | <i>Opuntia</i> sp.                                  | 7          | 0.439                    | 1.316      |
| Colorín                    | <i>Erythrina flabelliformis</i> Keamey  | 8          | 20.915                   | 4.003      | Chiococa        | <i>Chiococca pubescens</i>                          | 1          | 0.274                    | 0.822      |
|                            |   | 7          | 11.05                    | 2.115      | Palo arco       | <i>Tecoma stans</i>                                 | 1          | 0.087                    | 0.261      |
| Papache                    | <i>Randia megacarpa</i> Brandegee   |            | 10.744                   | 2.056      | Mamilaria       | <i>Mammillaria baxteriana</i> (H.E. Gates)<br>Boed. | 22         | 0.061                    | 0.183      |
| Celosa                     | <i>Mimosa xanti</i> A. Gray   | 11         | 10.351                   | 1.981      | Clavellina      | <i>Opuntia molesta</i> Brandegee                    | 1          | 0.031                    | 0.093      |
| Carricillo                 | <i>Lasiacis ruscifolia</i> (Kunth) Hitchc.                                    | 8          | 10.123                   | 1.937      | Guayabillo      | <i>Dodonaea viscosa</i> Jacq.                       | 1          | 0.025                    | 0.075      |
|                            |   | 10         | 5.796                    | 1.109      | Palo adán       | <i>Fouquieria diguetii</i> (Tiegh.) I.M.<br>Johnst. | 1          | 0.015                    | 0.045      |
| Liga                       | <i>Euphorbia californica</i> Benth.   | 10         | 5.356                    | 1.025      | Confituria      | <i>Lantana velutina</i> M. Martens &<br>Galeotti    | 1          | 0.014                    | 0.043      |
| Caliandra                  | <i>Calliandra</i> sp.   |            | 4.217                    | 0.807      | Biznaga         | <i>Ferocactus</i> sp.                               | 2          | 0.005                    | 0.015      |
| Copal                      | <i>Bursera hindsiana</i> Engl. in DC.   | 2          | 4.170                    | 0.798      | Viejito         | <i>Mammillaria</i> sp.                              | 1          | 0.003                    | 0.009      |
| Ruelia                     | <i>Ruellia leucantha</i> Nees   | 7          | 3.047                    | 0.583      | Encino laurel   | <i>Quercus albocincta</i> Trel.                     | 1          |                          |            |
| Rama prieta                | <i>Tephrosia cana</i> Brandegee   | 13         | 1.759                    | 0.336      |                 |   |            |                          |            |
| Acalifa                    | <i>Acalypha</i> sp.   | 7          | 1.735                    | 0.332      |                 |   |            |                          |            |
| Cardón barbón              | <i>Pachycereus pecten-aboriginum</i><br>(Engelm. ex S. Watson) Britton & Rose | 1          | 1.410                    | 0.269      |                 |   |            |                          |            |
| Ojito                      | <i>Rhynchosia pyramidalis</i> (Lam.) Urb.                                     | 2          | 0.439                    | 0.084      |                 |   |            |                          |            |
| Brickelia                  | <i>Brickellia</i> sp.   | 1          | 0.235                    | 0.044      |                 |   |            |                          |            |
| Malva                      | <i>Melochia tomentosa</i> L.  | 1          | 0.070                    | 0.013      |                 |   |            |                          |            |
| Tacote                     | <i>Viguiera tomentosa</i> A. Gray   | 1          |                          |            |                 |   |            |                          |            |
| Euforbia xanti             | <i>Euphorbia xanti</i> Engelm. ex Boiss.                                      | 1          |                          |            |                 |   |            |                          |            |
| <b>TOTALES</b>             | <b>23 especies</b>  |            | <b>522.419</b>           | <b>100</b> | <b>TOTALES</b>  | <b>16 especies</b>                                  |            | <b>33.354</b>            | <b>100</b> |

**AREA EL CRUCERO**

| ZONA CON POCA PERTURBACION |  |            |                          |            | ZONA EROSIONADA |   |            |                          |            |
|----------------------------|--|------------|--------------------------|------------|-----------------|---|------------|--------------------------|------------|
| Nombre común               | Especie  | Frecuencia | Cob. Tot. m <sup>2</sup> | Porcentaje | Nombre común    | Especie   | Frecuencia | Cob. Tot. m <sup>2</sup> | Porcentaje |
| Lomboy blanco              | <i>Jatropha cinerea</i> (Ortega) Müll. Arg.            | 28         | 142.603                  | 24.032     | Mauto           | <i>Lysiloma divaricata</i>                              | 20         | 27.575                   | 44.749     |
| Tacote                     | <i>Viguiera tomentosa</i>                              | 59         | 111.966                  | 18.909     | Tacote          | <i>Viguiera tomentosa</i>                               | 11         | 7.959                    | 12.916     |
| Liga                       | <i>Euphorbia californica</i> Benth.                    | 98         | 106.977                  | 18.067     | Palo eva        | <i>Pithecellobium undulatum</i> (Britton & Rose) Gentry | 3          | 7.370                    | 11.960     |
| Rama prieta                | <i>Tephrosia cana</i>                                  | 56         | 45.168                   | 7.628      | Lomboy rojo     | <i>Jatropha vernicosa</i>                               | 7          | 5.811                    | 9.430      |
| Pitaya dulce               | <i>Stenocereus thurberi</i>                            | 8          | 19.587                   | 3.308      | Damiana         | <i>Turnera diffusa</i> Willd. ex Schult.                | 109        | 3.844                    | 6.238      |
| Palo zorrillo              | <i>Senna atomaria</i> (L.) H.S. Irwin & Bameby         | 2          | 19.493                   | 3.292      | Palo adán       | <i>Fouquieria diguetii</i>                              | 2          | 3.296                    | 5.349      |
| Copal                      | <i>Bursera hindsiana</i>                               | 4          | 18.354                   | 3.099      | Palo de arco    | <i>Tecoma stans</i>                                     | 5          | 2.064                    | 3.349      |
| Oreganon                   | <i>Lippia formosa</i> Brandegee                        | 11         | 15.346                   | 2.592      | Lomboy blanco   | <i>Jatropha cinerea</i>                                 | 27         | 1.634                    | 2.651      |
| Cacachila                  | <i>Karwinskia humboldtiana</i>                         | 2          | 15.181                   | 2.564      | Pitaya dulce    | <i>Stenocereus thurberi</i>                             | 4          | 0.705                    | 1.143      |
| Ruelia                     | <i>Ruellia leucantha</i>                               | 19         | 14.796                   | 2.499      | Celosa          | <i>Mimosa xanti</i>                                     | 1          | 0.120                    | 0.195      |
| Malvarrosa                 | <i>Melochia tomentosa</i>                              | 47         | 13.862                   | 2.341      | Rama prieta     | <i>Tephrosia cana</i>                                   | 3          | 0.078                    | 0.126      |
| Vecina 2                   | <i>Justicia palmeri</i> Rose                           | 11         | 11.977                   | 2.022      | Carla           | <i>Carlwrightia</i> sp.                                 | 2          | 0.044                    | 0.072      |
| Carla                      | <i>Carlwrightia</i> sp.                                | 32         | 10.964                   | 1.852      | Biznaga         | <i>Ferocactus</i> sp.                                   | 2          | 0.021                    | 0.034      |
| Mauto                      | <i>Lysiloma divaricata</i>                             | 2          | 8.105                    | 1.369      | Malvarrosa      | <i>Melochia tomentosa</i>                               | 1          | 0.003                    | 0.004      |
| Acalipha                   | <i>Acalypha comonduana</i> Millsp.                     | 17         | 5.466                    | 0.923      |                 |   |            |                          |            |
| Dai                        | <i>Acacia macmurphyi</i> Wiggins                       | 5          | 5.034                    | 0.850      |                 |   |            |                          |            |
| Pimientilla                | <i>Adelia virgata</i> Brandegee                        | 2          | 3.927                    | 0.663      |                 |   |            |                          |            |
| Choya                      | <i>Cylindropuntia cholla</i> (F.A.C. Weber) F.M. Knuth | 3          | 3.919                    | 0.662      |                 |   |            |                          |            |
| Torote blanco              | <i>Bursera filicifolia</i> Brandegee                   | 1          | 3.730                    | 0.630      |                 |   |            |                          |            |
| Desconocida                | <i>Bourreria sonora</i> S. Watson                      | 1          | 3.628                    | 0.612      |                 |   |            |                          |            |
| Cardon barbon              | <i>Pachycereus pecten-aboriginum</i>                   | 7          | 3.413                    | 0.576      |                 |   |            |                          |            |
| Una de gato                | <i>Mimosa brandegei</i> B.L. Rob.                      | 1          | 2.670                    | 0.451      |                 |   |            |                          |            |
| Lomboy rojo                | <i>Jatropha vernicosa</i>                              | 1          | 2.277                    | 0.384      |                 |   |            |                          |            |
| Palo de arco               | <i>Tecoma stans</i>                                    | 1          | 1.884                    | 0.318      |                 |   |            |                          |            |
| Cordia                     | <i>Cordia brevispicata</i> M. Martens & Galeotti       | 1          | 0.863                    | 0.146      |                 |   |            |                          |            |
| Torote rojo                | <i>Bursera microphylla</i>                             | 2          | 0.628                    | 0.106      |                 |   |            |                          |            |
| Cardón                     | <i>Pachycereus pringlei</i> (S. Watson) Britton & Rose | 4          | 0.622                    | 0.105      |                 |   |            |                          |            |
| <b>TOTALES</b>             | <b>27 especies</b>                                     |            | <b>592.44</b>            | <b>100</b> | <b>TOTALES</b>  | <b>14 especies</b>                                      |            | <b>60.522</b>            | <b>100</b> |

## AREA CAÑADA DE LOS NARANJOS

| ZONA CON POCA PERTURBACION |  |            |                                     | ZONA EROSIONADA |   |            |                                     |
|----------------------------|--|------------|-------------------------------------|-----------------|---|------------|-------------------------------------|
| Nombre común               | Especie  | Frecuencia | Cob. Tot. m <sup>2</sup> Porcentaje | Nombre común    | Especie   | Frecuencia | Cob. Tot. m <sup>2</sup> Porcentaje |
| Lomboy blanco              | <i>Jatropha cinerea</i>                              | 28         | 187.349 25.262                      | Palo adán       | <i>Fouquieria diguetii</i>                          | 33         | 47.854 47.67                        |
| Palo de arco               | <i>Tecoma stans</i>                                  | 69         | 165.574 22.326                      | Guayabillo      | <i>Dodonaea viscosa</i>                             | 33         | 20.23 20.152                        |
| Ciruelo                    | <i>Cyrtocarpa edulis</i> (Brandegee) Standl.         | 2          | 148.291 19.993                      | Cacachila       | <i>Karwinskia humboldtiana</i>                      | 10         | 10.869 10.827                       |
| Palo eva                   | <i>Pithecellobium undulatum</i>                      | 12         | 138.018 18.61                       | Mauto           | <i>Lysiloma divaricata</i>                          | 13         | 6.269 6.244                         |
| Cacachila                  | <i>Karwinskia humboldtiana</i>                       | 10         | 60.467 8.153                        | Palo blanco     | <i>Lysiloma candidum</i> Brandegee                  | 6          | 5.329 5.308                         |
| Uña de gato                | <i>Mimosa brandegei</i>                              | 7          | 12.998 1.751                        | Celosa          | <i>Mimosa xanti</i>                                 | 9          | 3.779 3.764                         |
| Pitaya dulce               | <i>Stenocereus thurberii</i>                         | 29         | 12.275 1.664                        | Lomboy rojo     | <i>Jatropha vernicosa</i>                           | 2          | 1.421 1.416                         |
| Cardón barbón              | <i>Pachycereus pecten-aboriginum</i>                 | 11         | 5.149 0.694                         | Rama prieta     | <i>Tephrosia cana</i>                               | 9          | 1.179 1.174                         |
| Mauto                      | <i>Lysiloma divaricata</i>                           | 1          | 4.476 0.603                         | Chiococa        | <i>Chiococca pubescens</i>                          | 3          | 0.942 0.938                         |
| Cardon                     | <i>Pachycereus pringlei</i>                          | 4          | 4.401 0.592                         | Copal           | <i>Bursera hindsiana</i>                            | 1          | 0.753 0.752                         |
| Garambullo                 | <i>Myrtillocactus cochal</i> (Orcutt) Britton & Rose | 2          | 2.409 0.324                         | Sambo           | <i>Coursetia glandulosa</i> A. Gray                 | 8          | 0.426 0.424                         |
| Biznaga                    | <i>Ferocactus sp.</i>                                | 2          | 0.141 0.019                         | Choya           | <i>Cylindropuntia cholla</i>                        | 3          | 0.419 0.417                         |
| Palo zorrillo              | <i>Senna atomaria</i>                                | 1          | 0.07 0.009                          | Bernardia       | <i>Bernardia mexicana</i> (Hook. & Arn.) Müll. Arg. | 1          | 0.219 0.219                         |
|                            |  |            |                                     | Ruelia          | <i>Ruellia leucantha</i>                            | 2          | 0.219 0.218                         |
|                            |  |            |                                     | Brasil          | <i>Haematoxylum brasiletto</i> H. Karst.            | 1          | 0.212 0.211                         |
|                            |  |            |                                     | Lomboy blanco   | <i>Jatropha cinerea</i>                             | 8          | 0.117 0.116                         |
|                            |  |            |                                     | Magueycillo     | <i>Agave sp.</i>                                    | 6          | 0.045 0.045                         |
|                            |  |            |                                     | Jacalosucho     | <i>Plumeria acutifolia</i> Poir.                    | 2          | 0.044 0.044                         |
|                            |  |            |                                     | Palo colorado   | <i>Colubrina glabra</i> S. Watson                   | 1          | 0.018 0.018                         |
|                            |  |            |                                     | Biznaga         | <i>Ferocactus sp.</i>                               | 2          | 0.014 0.015                         |
|                            |  |            |                                     | Viejito         | <i>Mammillaria sp.</i>                              | 1          | 0.014 0.014                         |
|                            |  |            |                                     | Pitaya dulce    | <i>Stenocereus thurberii</i>                        | 1          | 0.011 0.011                         |
|                            |  |            |                                     | Mamilaria       | <i>Mammillaria sp.</i>                              | 1          | 0.001 0.001                         |
|                            |  |            |                                     | Palo de arco    | <i>Tecoma stans</i>                                 | 2          | 0.001 0.001                         |
|                            |  |            |                                     | Torote rojo     | <i>Bursera microphylla</i>                          | 2          | 0.001 0.001                         |
| <b>TOTALES</b>             | <b>13 especies</b>                                   |            | <b>741.618 100</b>                  | <b>TOTALES</b>  | <b>25 especies</b>                                  |            | <b>100.386 100</b>                  |

## ANEXO 4

Registro de cobertura de la vegetación en las tres áreas de estudio, durante varias visitas al campo de 1997 a 2000

### AREA SAN ANTONIO DE LA SIERRA

| Nombre común  | Especie                         | Feb | Mar | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov |
|---------------|---------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Acalifa       | <i>Acalypha</i> sp.             | x   |     |     |     |     | x   | x   |     |
| Cacachila     | <i>Karwinskia humboldtiana</i>  | x   | x   | x   | x   | x   | x   | x   | x   |
| Caliandra     | <i>Calliandra</i> sp.           | x   |     |     |     | x   | x   | x   | x   |
| Carricillo    | <i>Lasiacis ruscifolia</i>      |     |     |     |     |     |     | x   | x   |
| Celosa        | <i>Mimosa xanti</i>             | x   |     |     |     | x   | x   | x   | x   |
| Chiococa      | <i>Chiococca pubescens</i>      | x   |     |     |     | x   | x   | x   | x   |
| Colorin       | <i>Erythrina flabelliformis</i> |     |     |     |     | x   |     |     |     |
| Croton        | <i>Croton boregensis</i>        | x   |     |     |     | x   | x   | x   | x   |
| Guayabillo    | <i>Dodonaea viscosa</i>         | x   |     |     |     | x   | x   | x   | x   |
| Encino roble  | <i>Quercus devia</i> Goldman    | x   | x   |     |     | x   | x   | x   | x   |
| Encino laurel | <i>Quercus albocincta</i>       | x   | x   |     |     | x   | x   | x   | x   |
| Lomboy rojo   | <i>Jatropha vernicosa</i>       |     |     |     |     | x   | x   |     |     |
| Malva         | <i>Melochia tomentosa</i>       | x   |     |     |     | x   | x   | x   | x   |
| Mauto         | <i>Lysiloma divaricata</i>      |     |     |     |     | x   | x   | x   | x   |
| Palo adán     | <i>Fouquieria diguetii</i>      | x   |     |     |     | x   | x   |     |     |
| Palo de arco  | <i>Tecoma stans</i>             | x   |     |     |     | x   | x   | x   | x   |
| Papache       | <i>Randia megacarpa</i>         | x   |     |     |     | x   | x   | x   | x   |
| Rama prieta   | <i>Tephrosia cana</i>           |     |     |     |     | x   | x   | x   | x   |
| Tacote        | <i>Viguiera tomentosa</i>       | x   |     |     |     | x   | x   | x   | x   |
| Torote        | <i>Bursera microphylla</i>      | x   |     |     |     | x   | x   | x   |     |
| Vinorama      | <i>Acacia farnesiana</i>        | x   |     |     |     | x   |     |     |     |

### AREA EL CRUCERO

| Nombre común  | Especie                               | Feb | Mar | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov |
|---------------|---------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Bernardia     | <i>Bernardia mexicana</i>             | x   |     |     |     | x   |     | x   | x   |
| Cacachila     | <i>Karwinskia humboldtiana</i>        | x   | x   | x   | x   | x   | x   | x   | x   |
| Carla         | <i>Carlowrightia</i> sp.              | x   |     |     |     | x   |     | x   |     |
| Celosa        | <i>Mimosa xanti</i>                   |     |     |     |     |     | x   | x   | x   |
| Copal         | <i>Bursera hindsiana</i>              |     |     |     |     |     | x   | x   | x   |
| Damiana       | <i>Turnera diffusa</i>                |     |     |     |     |     | x   | x   | x   |
| Lomboy blanco | <i>Jatropha cinerea</i>               |     |     |     |     | x   | x   | x   |     |
| Lomboy rojo   | <i>Jatropha vernicosa</i>             |     |     |     |     | x   | x   | x   |     |
| Malvarrosa    | <i>Melochia tomentosa</i>             | x   |     |     |     | x   |     | x   | x   |
| Mauto         | <i>Lysiloma divaricata</i>            | x   |     |     |     | x   | x   | x   | x   |
| Palo adán     | <i>Fouquieria diguetii</i>            |     |     |     |     | x   |     |     | x   |
| Palo eva      | <i>Pithecellobium undulatum</i>       | x   |     | x   |     |     | x   | x   | x   |
| Palo escopeta | <i>Albizzia occidentalis</i> Brandege |     |     |     |     | x   |     | x   | x   |

### AREA EL CRUCERO (cont.)

| Nombre común  | Especie                    | Feb | Mar | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov |
|---------------|----------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Palo de arco  | <i>Tecoma stans</i>        | x   |     | x   |     | x   | x   | x   | x   |
| Palo zorrillo | <i>Senna atomaria</i>      | x   |     |     |     | x   | x   | x   | x   |
| Papache       | <i>Randia megacarpa</i>    | x   |     |     |     |     | x   | x   | x   |
| Tacote        | <i>Viguiera tomentosa</i>  | x   |     |     |     | x   |     | x   | x   |
| Torote blanco | <i>Bursera filicifolia</i> | x   |     |     |     | x   |     | x   |     |
| Uña de gato   | <i>Mimosa brandegei</i>    |     |     |     |     | x   |     | x   |     |

### AREA CAÑADA DE LOS NARANJOS

| Nombre común  | Especie                        | Feb | Mar | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov |
|---------------|--------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Cacachila     | <i>Karwinskia humboldtiana</i> | x   | x   | x   | x   | x   | x   | x   | x   |
| Celosa        | <i>Mimosa xanti</i>            | x   |     |     |     | x   | x   | x   | x   |
| Chiococa      | <i>Chiococca pubescens</i>     |     |     |     |     | x   |     |     | x   |
| Ciruelo       | <i>Cyrtocarpa edulis</i>       |     |     |     |     | x   | x   | x   | x   |
| Copal         | <i>Bursera hindsiana</i>       |     |     |     |     | x   |     | x   | x   |
| Jacalosucho   | <i>Plumeria acutifolia</i>     |     |     |     |     | x   |     | x   | x   |
| Lombay blanco | <i>Jatropha cinerea</i>        |     |     |     |     | x   | x   | x   | x   |
| Lombay rojo   | <i>Jatropha vernicosa</i>      |     |     |     |     | x   | x   | x   | x   |
| Mauto         | <i>Lysiloma divaricata</i>     |     |     |     |     | x   | x   | x   | x   |
| Palo adán     | <i>Fouquieria diguetii</i>     | x   |     |     |     | x   | x   |     | x   |
| Palo blanco   | <i>Lysiloma candidum</i>       | x   |     |     |     | x   |     | x   | x   |
| Palo colorado | <i>Colubrina glabra</i>        | x   |     |     |     | x   | x   | x   | x   |
| Palo de arco  | <i>Tecoma stans</i>            | x   |     |     |     | x   | x   | x   | x   |
| Palo escopeta | <i>Albizzia occidentalis</i>   | x   |     | x   |     | x   | x   | x   | x   |
| Palo zorrillo | <i>Senna atomaria</i>          | x   |     |     |     | x   |     | x   | x   |
| Rama prieta   | <i>Tephrosia cana</i>          | x   |     |     |     | x   | x   | x   | x   |
| Sambo         | <i>Coursetia glandulosa</i>    | x   |     |     |     | x   |     | x   |     |
| Tacote        | <i>Viguiera tomentosa</i>      | x   |     |     |     |     |     | x   | x   |
| Torote rojo   | <i>Bursera microphylla</i>     | x   |     |     |     | x   | x   | x   | x   |