

**UNIVERSIDAD AUTONOMA DE
BAJA CALIFORNIA**

FACULTAD DE CIENCIAS

**BALANCE DEL AGUA DEL SUELO EN TRES SITIOS DE ESTUDIO
EN LA SIERRA DE SAN PEDRO MARTIR, BAJA CALIFORNIA**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE

BIOLOGO

PRESENTA

MARTIN ESCOTO RODRIGUEZ

ENSENADA, B. C.

AGOSTO DE 1994

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE BAJA CALIFORNIA
FACULTAD DE CIENCIAS

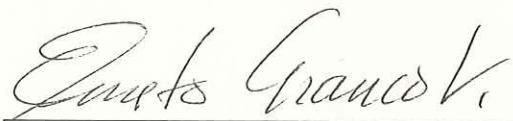
BALANCE DEL AGUA DEL SUELO EN TRES SITIOS DE ESTUDIO EN LA
SIERRA DE SAN PEDRO MARTIR, BAJA CALIFORNIA

TESIS PROFESIONAL

QUE PRESENTA

MARTIN ESCOTO RODRIGUEZ

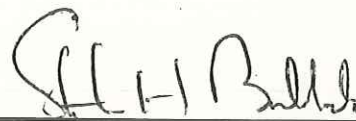
APROBADO POR:



DR. ERNESTO FRANCO VIZCAINO
Presidente del Jurado



M. C. CESAR VALENZUELA SOLANO
SECRETARIO



DR. STEPHEN H. BULLOCK
1er. VOCAL

DEDICATORIA

Con todo cariño a mis padres

Jesús Escoto Ramírez

y

Felicitas Rodríguez de Escoto

en reconocimiento a todos los años
de esfuerzo y dedicación.

AGRADECIMIENTOS

Primero que todo, quiero agradecer el cariño y la ayuda que siempre he recibido de mis Padres. Sin eso, esta tesis no hubiera sido posible. A todos mis hermanos y toda mi familia, gracias por su apoyo y comprensión; agradezco en especial a Fernando y Jesús Lorenzo. En el mismo sentido, mi agradecimiento a María Elena Meza por ese amor y por el gran ánimo que siempre me da.

A mis coodirectores de tesis. Al Dr. Ernesto Franco por la orientación y por todo el apoyo que me ha brindado, por encauzarme hacia la ciencia, por confiar en mí como técnico de varios proyectos de investigación (incluyendo éste que hoy presento como tesis), y por permitirme la conducción completa del proyecto de SSPM para presentarlo como tesis de licenciatura. Al Dr. Stephen Bullock por su desinteresada y siempre valiosa asesoría, por sus minuciosas revisiones del presente trabajo, y por ampliarme mi visión de la ciencia. Gracias a los dos por la formación que me han dado.

A mi sinodal M.C. Cesar Valenzuela por su empeño en la revisión y crítica del trabajo.

El trabajo de campo fue una labor ardua, que no hubiera sido posible sin la colaboración de muchos amigos. Agradezco muy en especial la cooperación de Celerino Montes y Gerardo Chávez. Mi reconocimiento, también, para las siguientes personas: Ernesto Franco, Joaquín Sosa, Fernando Escoto, Nora Martijena, Mario Salazar, Lydia Salazar, y Walter Zúñiga. A todos ellos gracias por compartir conmigo momentos tan agradables.

En la montaña siempre contamos con la ayuda del personal de la SARH encargado del cuidado del Parque Nacional. Muchas gracias a los jefes de brigada: Francisco Mayoral y Librado Anaya. Asimismo, siempre estuvimos apoyados logísticamente por el Instituto de Astronomía de la UNAM. Por ello quiero agradecer a Rafael Costero, Francisco Martínez, Alfredo Meling, Ignacio González, Desiderio Carrasco, y a todo el personal de

la montaña (mecánicos, choferes, cocineras e intendentes).

Durante el trabajo de "gabinete" siempre conté con los consejos y críticas constructivas del grupo de ecología de la vegetación terrestre del CICESE, el cual dirige Steve: muchas gracias a Nora Martijena (de quien recibí excelentes críticas), Celerino Montes, Mario Salazar, María Angoa, Gerardo Chávez (ahora en geología) y Joaquín Sosa. Con cada uno de ellos tuve pláticas valiosas. Además, la tesis (y partes de ella) la expuse en algunas ocasiones, ante este grupo, en el seminario del laboratorio. En esos seminarios y en todo momento también me apoyaron Claudia Leyva y Cecilia Díaz. En las computadoras muchas veces coincidí, a las 4 ó 5 de la mañana, con Mario Salazar, quien me brindó mucho apoyo; en esas horas también trabajaba Héctor Atilano; nos animábamos mutuamente. A Celerino Montes le doy gracias por su gran apoyo, por la revisión del escrito y por compartir conmigo su filosofía de la vida. Por esto último, también le estoy muy agradecido a María Angoa. A Cecilia Díaz le agradezco ese gran cúmulo de ánimos que siempre me regaló. A todos ellos, gracias por su amistad y por hacerme grato el trabajo académico.

A Richard Minnich por su colaboración en la parte meteorológica del estudio, así como el habernos facilitado mapas de vegetación de Baja California.

A Joaquín Sosa por su apoyo de carácter logístico, además, por haberme proporcionado información de la vegetación de SSPM.

A Robert Graham por la descripción pedológica de los sitios de estudio y por compartir conmigo grandes aventuras en la sierra.

Al grupo de meteorología del CICESE, en especial a Sergio Reyes y Javier García, por apoyarnos con los pronósticos del clima durante la planeación de los viajes a la montaña, y por facilitarnos algunos datos meteorológicos.

A la SARH y al Ing. Orozco, por los datos meteorológicos que nos proporcionaron.

A Lydia Salazar, gracias por su apoyo secretarial. Asimismo, al personal administrativo del CICESE por su cooperación. Al CICESE le agradezco el apoyo académico, económico y logístico, indispensables para la realización de este estudio.

También quiero agradecer todo el estímulo que he recibido de mis amigos del grupo de danza folklórica "Telpochcalli".

Este estudio ha sido financiado, como parte de un proyecto internacional dirigido por el Dr. Michael Barbour, por el programa MAB (Man and Biosphere) de la UNESCO, y por el programa UC-MEXUS de la Universidad de California.

RESUMEN

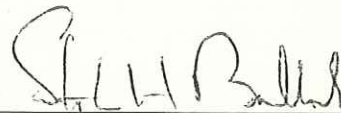
RESUMEN de la tesis de Martín Escoto Rodríguez presentada como requisito parcial para la obtención de la Licenciatura en Biología. Ensenada, Baja California, México, Agosto de 1994.

Título de la tesis: "Balance del agua del suelo en tres sitios de estudio de la Sierra de San Pedro Mártir, Baja California".

Resumen aprobado:



Dr. Ernesto Franco Vizcaíno



Dr. Stephen H. Bullock

Las zonas montañosas son captadoras de precipitación hídrica y mediante drenaje y escurrimientos proveen de agua a las zonas bajas. Esto no había sido estudiado en Baja California. En el presente estudio se analiza el balance hídrico de las montañas más altas de la península: La Sierra de San Pedro Mártir (SSPM).

Se eligieron tres sitios representativos de las comunidades vegetales más singulares: a) bosque de *Pinus jeffreyi* (La Puerta, 1980 msnm) b) bosque de coníferas mixto donde hay una mayor diversidad y densidad de árboles (La Corona, 2470 msnm) y c) pradera de altitud (Vallecitos, 2380 msnm). En ellos se midió la precipitación tanto en forma de agua como de nieve, se monitoreó la humedad del suelo con una sonda de neutrones y se estimó el escurrimiento y drenaje profundo por medio de un diseño especial de lisímetros, de abril de 1990 a octubre de 1992. La evapotranspiración se determinó por diferencia utilizando los demás valores en la fórmula general del balance hídrico.

En SSPM se distinguen dos períodos de precipitación, uno en invierno y otro en verano. En los años del estudio la lluvia de invierno (562 ± 75 mm) fue tres veces mayor que la de verano (181 ± 77 mm). Por otro lado, la variación interanual es grande. Por ejemplo en La Puerta en 1991 cayeron 631 mm, en 1992 970 mm y se estima que en 1993 cayeron alrededor de 1700 mm.

En los sitios de bosque el suelo tiene poca profundidad (de 60 a 80 cm) y junto con su textura gruesa originan una pequeña capacidad de almacenamiento de agua extraíble (La Corona = 77 mm, La Puerta = 137 mm). Debido a esto, una gran parte de la lluvia de invierno (del 60 al 70%) se fue por escurrimientos y drenaje. Poca agua se conserva para la evapotranspiración del verano; se aportó en promedio 55 ± 19 mm en La Puerta y 25 ± 18 mm en La Corona. Sin embargo, las lluvias de verano fueron una entrada de agua apreciable para la evapotranspiración del verano. La evapotranspiración anual en La Corona fue 299 ± 38 mm (40% de la precipitación anual) y en La Puerta 376 ± 83 mm (47%).

En Vallecitos, en los años húmedos (1991 y 1992), quizás entró más agua por escurrimientos (>697 y >423 mm) que por precipitación (595 y 633 mm). En esos inviernos se formó una pequeña laguna que desapareció hasta mayo. Debido a esa gran disponibilidad de agua la evapotranspiración (501 ± 23 mm) fue alta en comparación con los sitios de bosque.

Todo parece indicar que los bosques estudiados dependen más de las lluvias de verano que del agua almacenada en el suelo. Lo poco confiable de las lluvias de verano podría explicar, en parte, la baja densidad de árboles de SSPM en comparación con bosques del Sur de California, los cuales parecen tener mayor almacenamiento de agua en el suelo.

CONTENIDO

APROBACION DEL TRABAJO	I
AGRADECIMIENTOS	III
RESUMEN	VI
INDICE DEL TRABAJO	VII
a) Contenido	VII
b) lista de figuras	IX
c) lista de tablas	XI
1 INTRODUCCION	1
1.1 Importancia del agua en Baja California.	1
1.2 ¿Qué es el balance del agua?	2
1.3 La importancia de la Sierra de San Pedro Mártir.	5
1.4 ¿De qué forma se puede medir el balance de agua?	6
2 ANTECEDENTES	8
2.1 Precipitación.	8
2.2 Escurrimientos.	8
2.3 Drenaje.	11
2.4 Evaporación.	11
2.5 Transpiración.	12
2.6 Humedad del suelo.	14
2.7 Métodos.	16
2.8 La Sierra de San Pedro Mártir y el balance hídrico en la región.	18
3 OBJETIVOS	20
4 AREA GEOGRAFICA DE ESTUDIOS	21
4.1 Descripción física de la Sierra.	21
4.2 Geología.	23
4.3 Hidrología.	23
4.4 Clima.	25
4.5 Vegetación.	28
4.6 La Puerta.	32
4.7 La Corona.	34
4.8 Vallecitos.	34
5 METODOLOGIA	36
5.1 Procedimiento para medir la precipitación (P).	36
5.2 Procedimiento para medir el drenaje (D_{lis}).	37
5.3 Procedimiento para medir la humedad del suelo (A_{lis} , A_{suelo}) y calibrar la sonda de neutrones.	39
5.4 Procedimiento para medir la escorrentía (R).	42
5.5 Evapotranspiración (ET).	45
5.6 Cálculos.	46

6 RESULTADOS	48
6.1 Comprobación de la similitud de condiciones entre los lisímetros y el estado natural.	48
6.2 Precipitación.	50
6.3 Humedad del suelo.	53
6.3.1 La humedad del suelo dentro y fuera de los lisímetros.	53
6.3.2 La humedad del suelo en invierno y verano.	56
6.3.3 Comparación de la humedad del suelo en los tres años.	57
6.3.4 Comparación de la humedad del suelo entre los tres sitios.	59
6.3.5 Particularidades de Vallecitos.	59
6.3.6 Capacidad de almacenamiento de agua extraíble.	61
6.3.7 Información extra que proporciona el lisímetro.	63
6.4 Balance hídrico.	67
6.4.1 Drenaje y escorrentía.	67
6.4.2 Evapotranspiración.	72
7 DISCUSION	76
7.1 Precipitación.	76
7.2 Humedad del suelo.	76
7.3 Balance hídrico.	78
7.4 Metodología.	81
8 CONCLUSIONES	84
9 RECOMENDACIONES	88
10 LITERATURA CITADA	90

LISTA DE FIGURAS

Fig. 1.	Esquema del balance hídrico del suelo	3
Fig. 2.	Localización de los sitios de estudio	9
Fig. 3.	Sección transversal de la Sierra de San Pedro Mártir y sus vertientes este y oeste	22
Fig. 4.	Familia de Cuencas de la vertiente oeste de la Sierra de San Pedro Mártir	24
Fig. 5.	Distribución anual de precipitación y temperatura en la Sierra de San Pedro Mártir y sus alrededores	26
Fig. 6a.	Vegetación del Noroeste de Baja California y del Suroeste de California.	29
Fig. 6b.	Vegetación de la Sierra de San Pedro Mártir	30
Fig. 7.	Esquema del lisímetro y del sistema de medición	38
Fig. 8.	Esquema del escurrímetro	44
Fig. 9.	Densidad del suelo dentro y fuera de los lisímetros.....	49
Fig. 10.	Precipitación en los ejes norte-sur y este-oeste de la Sierra de San Pedro Mártir en las temporadas de precipitación de invierno y verano	51
Fig. 11.	Dinámica de la humedad del suelo en La Puerta y La Corona, dentro y fuera de los lisímetros. Se muestra además la precipitación acumulada entre visitas	54
Fig. 12.	Dinámica de la humedad del suelo en Vallecitos dentro y fuera de los lisímetros. Se muestra además la precipitación acumulada entre visitas ...	55
Fig. 13.	Comparación de la dinámica de la humedad del suelo de abril a diciembre entre los tres años en los tres sitios de estudio	58

- Fig. 14. Comparación de la dinámica de la humedad del suelo entre los tres sitios de estudio 60
- Fig. 15. Dinámica de la humedad del suelo en una capa promedio de 20 cm de espesor en la profundidad de 20 a 80 y en la profundidad de 80 a 140 en Vallecitos 62
- Fig. 16. Dinámica de la humedad del suelo en la capa 0-20 y en el promedio de las capas 20-40 y 40-60 en La Puerta y La Corona dentro y fuera de los lisímetros..... 64
- Fig. 17. Dinámica de la humedad del suelo por capas de 20 cm de espesor en Vallecitos dentro y fuera de los lisímetros..... 66

LISTA DE TABLAS

Tabla I	Características de los bosques en los sitios de estudio.....	31
Tabla II	Descripción de los sitios de estudio	33
Tabla III	Características de los suelos en los 30 cm superficiales	33
Tabla IV	Valores de "a" (intersección) y "b" (pendiente) de las curvas de calibración de la sonda de neutrones.....	43
Tabla V	Balance hídrico estimado (mm) por períodos de precipitación en los sitios de estudio de la Sierra de San Pedro Mártir	68
Tabla VI	Mediciones de la nieve en la Sierra de San Pedro Martir	69
Tabla VII	Balance hídrico anual (mm) de los sitios de estudio de la de San Pedro Mártir y de bosques de E.U.A. cercanos	73

1 INTRODUCCION

1.1 Importancia del agua en Baja California.

Las regiones del mundo que presentan un clima tipo mediterráneo, es decir una estación fresca húmeda que alterna con un verano caliente y seco, han atraído desde hace mucho tiempo a una población humana considerable (Specht, 1988; Wells, 1982). Con el aumento de la población ha aumentado, también, la intensidad del manejo de la región. Esto ha dado como resultado una transformación considerable de los ecosistemas que se desarrollan en estos paisajes calurosos, secos y propensos al fuego.

La parte Noroeste de Baja California, la cual tiene un clima mediterráneo, no se escapa a la problemática antes mencionada: tiene un acelerado crecimiento de la población, y por ende una gran necesidad de recursos. Lo anterior, sumado al hecho de que el resto del estado es árido y a las características geológicas y orográficas de la región, hace que exista un grave problema: la escasa disponibilidad de agua para uso doméstico, agrícola e industrial (Paredes, 1985).

El agua, a pesar de que es esencial para la vida, no sólo causa problemas cuando escasea sino que en determinadas circunstancias puede causar muerte y destrucción a gran escala (Satterlund y Adams, 1992), tal y como sucedió en Baja California a principios del año 1993 (García y Reyes, en prensa).

Surge así la necesidad de que el sector científico, en colaboración con los demás sectores de la sociedad, genere alternativas para un mejor manejo del agua en la región. En este sentido es importante estudiar, en primera instancia, los fenómenos que regulan la variabilidad espacial y temporal de los recursos hídricos de la región.

A pesar de que la red meteorológica en el estado es inadecuada, el estudio climático de la región está algo avanzado (García y Mosiño, 1968; Markham, 1972, Reyes y Rojo,

1985; Rojo, 1985; Miranda, 1987). En cambio, el conocimiento de los procesos hidrológicos una vez que el agua llega al suelo - su escurrimiento, drenaje, almacenamiento y evapotranspiración - es prácticamente nulo.

1.2 ¿Qué es el balance del agua?

La entrada principal de agua en la tierra es la precipitación, la cual cae en forma de lluvia, granizo o nieve (Satterlund y Adams, 1992). Parte de ella es retenida en la superficie del suelo y de la vegetación y es evaporada de regreso a la atmósfera (evaporación). El resto puede fluir por la superficie hacia los arroyos (escurrimiento) o infiltrarse dentro del suelo. Parte de toda el agua que entra al suelo es conservada por fuerzas capilares y puede ser evaporada directamente (evaporación) o absorbida por las raíces de las plantas y conducida hacia la atmósfera (transpiración). Si el agua que entró al suelo es más que la que puede ser retenida, el exceso se percola a través del suelo, donde lenta o rápidamente se mueve en sentido horizontal pudiendo alimentar a los arroyos (movimiento lateral) o continúa en sentido vertical hacia el manto freático (drenaje) que puede después salir en un arroyo o manantial o sostener el flujo de ríos durante períodos secos (Fig. 1).

A partir del análisis anterior se visualizan tres compartimientos naturales que están unidos por el flujo de agua en el ciclo hidrológico: la atmósfera, el suelo y la vegetación. El agua se mueve a través de ellos de una forma muy variable, tanto en tiempo como en espacio, y es debido a esta dinámica que su conservación es difícil.

El estudio del balance hídrico, o presupuestos de agua, para un sitio en particular es el análisis de los volúmenes de agua en cada uno de los caminos que toma ésta para entrar, para permanecer o para salir del sitio, durante determinados períodos de tiempo ya sean horas, días, meses o años (Harrold, 1969). El sistema en el cual coinciden la mayoría de estos caminos es el suelo, por eso se le conoce también como balance hídrico del suelo. Se

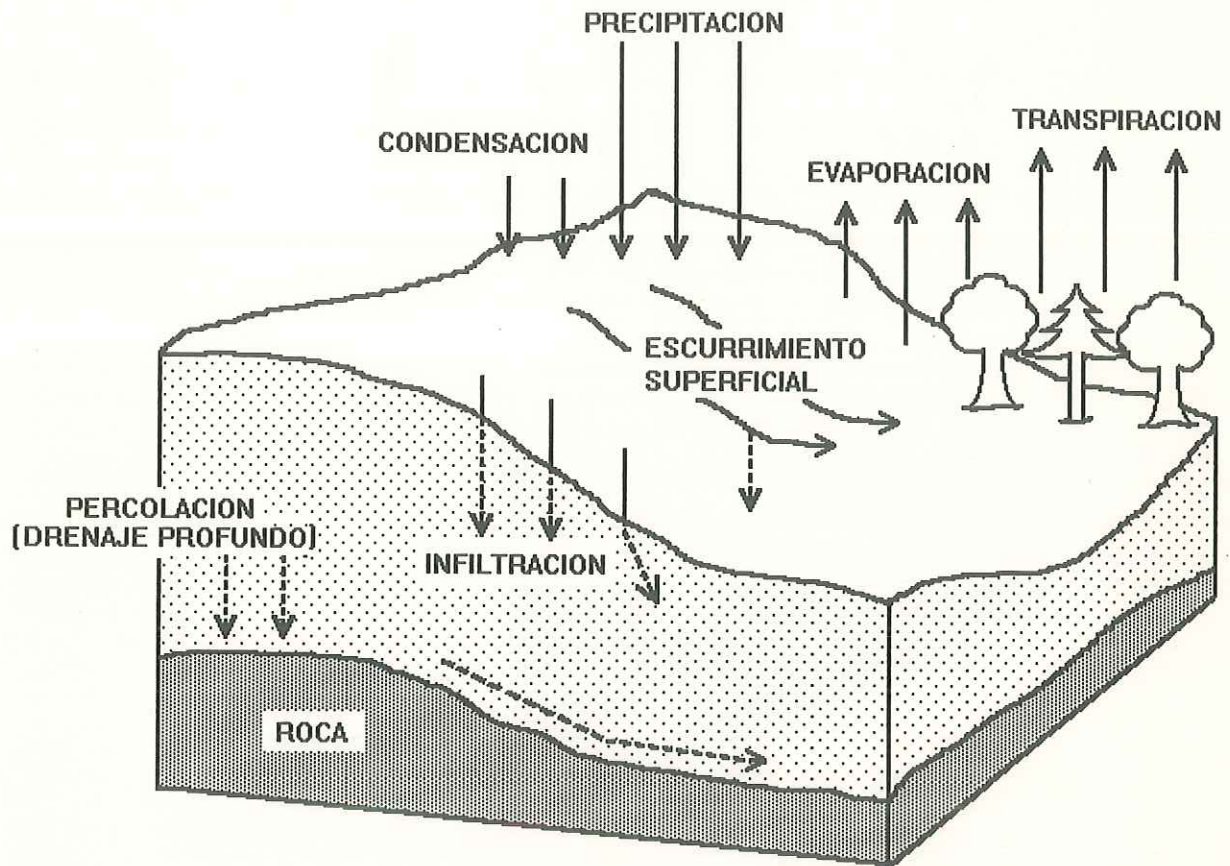


Fig. 1. El balance hídrico del suelo.

habla, entonces, de balance en el sentido de computo o contabilidad de volúmenes. En este sentido, es fundamental comprender que el total de agua que llega al suelo, más lo que ya estaba en el sistema, es igual al total de agua de todas las salidas más lo que permanece en el sistema. Entre las entradas tenemos: la precipitación pluvial en sus tres formas (lluvia, nieve y granizo), el rocío, la escarcha y la niebla. El escurrimiento y el drenaje también pueden aportar agua dependiendo de la ubicación topográfica del sitio de estudio. Entre las salidas más importantes podemos contar al almacenaje en el suelo (que puede recibir o liberar agua), el drenaje, el escurrimiento, la evaporación y la transpiración (Rutter, 1975; Noy-Meir, 1973; Barbour *et al.*, 1987).

Si suponemos que no existe un movimiento neto de agua del suelo en dirección horizontal (flujo lateral), que las raíces tienen una profundidad limitada por arriba del manto freático permanente, y que la entrada de agua por rocío, escarcha y niebla no es significativa, entonces la ecuación básica del balance hídrico es:

$$P = R + D + ET + \Delta A \quad (1)$$

donde:

P = precipitación.

R = escurrimiento.

D = drenaje o percolación profunda.

$ET = E + T$ = evapotranspiración, es decir evaporación del suelo (E) más transpiración de las plantas (T).

ΔA = agua almacenada en una capa de suelo de dimensión Z ; es decir, la diferencia entre el principio y el final del período en la profundidad principal de las raíces (Gavande, 1982; Kramer, 1969; Lane y Barnes, 1986; Noy-Meir, 1973; Rutter, 1968).

1.3 La importancia de la Sierra de San Pedro Mártir.

Ahora bien, ¿en qué sitios es preferible estudiar el balance hídrico?

Sabemos que las áreas naturales, y sobre todo las montañas, son nuestra principal fuente de agua utilizable (Satterlund y Adams, 1992). Las montañas son captadoras de precipitación hídrica y mediante escurrimientos y drenaje proveen de agua a las zonas bajas. La vertiente occidental de Baja California, comprendida entre San Isidro y El Rosario, así como los valles de la Trinidad y de San Felipe (este último en la vertiente oriental), tienen como principales fuentes de abastecimiento de agua a las cuencas hidrológicas de la Sierra de San Pedro Mártir (Blásquez, 1959, citado por Ruíz-Campos, 1991; Yrurentagoyena, 1992). En esa región, influenciada por los escurrimientos de esta montaña, hay zonas de importancia agrícola y turística. Es por esto que el conocimiento de la hidrología de la Sierra de San Pedro Mártir (SSPM) es de gran relevancia.

La importancia socio-económica del presente estudio, queda clara con reconocer los contextos urbano y agrícola, pero ¿tiene importancia para el conocimiento ecológico de la región?

El entendimiento del papel de las poblaciones de árboles en el balance de agua de un bosque es importante para el mejoramiento en las predicciones de la influencia que la superficie con vegetación juega sobre los procesos hidrológicos regionales y globales. Esto incluye la predicción de cómo estos ecosistemas pueden responder a un aumento en la deforestación y cambios climáticos (Dawson, 1993). Normalmente, los árboles en los bosques son la ruta primaria o el conducto por el cual el agua del suelo y del manto freático se reintegra al ciclo hidrológico.

Por otra parte, SSPM sirve como punto de referencia en estudios que tengan como fin establecer las consecuencias que distintas formas de manejo han tenido sobre el funcionamiento de los ecosistemas del Sur de California. Los bosques de coníferas de SSPM

son similares a los del Sur de California en la composición de especies; comparten, además, un substrato granítico y un clima mediterráneo similares. Sin embargo, los regímenes de incendios en las dos regiones son muy diferentes. En California la supresión de incendios se ha practicado desde 1900 y no se ha permitido el pastoreo desde 1930 en algunas zonas protegidas. En contraste, en Baja California, la supresión de incendios es muy reciente y su efectividad ha sido baja, mientras que la intensidad del pastoreo ha sido de moderada a alta desde principios de siglo (Sosa-Ramírez y Franco-Vizcaíno, 1991; Barbour *et al.*, 1991). Como consecuencia, los bosques de SSPM presentan una estructura abierta (ca. 50-150 árboles por hectárea); en cambio, en los californianos se ha incrementado la densidad de las poblaciones, llegando a más de 500 árboles por hectárea (Barbour *et al.*, 1991). En este sentido, los bosques de SSPM son únicos porque son las últimas grandes poblaciones de coníferas dentro de la Provincia Florística Californiana que todavía no están sujetas a la política de supresión de incendios. El ciclo hidrológico puede ser uno de los procesos más afectados por estas políticas de manejo.

1.4 ¿De qué forma se puede medir el balance de agua?

Respecto a los métodos podemos decir que existen los directos y los de estimación, que emplean modelos matemáticos con datos meteorológicos (en la sección 2 "Antecedentes" se dan más detalles de métodos para estudiar el balance hídrico). Estos últimos requieren de la calibración del modelo para casos particulares. Además, requieren del conocimiento de más variables que las proporcionadas por estaciones meteorológicas comunes, y de contar con varios años de tales datos meteorológicos. Así, la aplicación de modelos de estimación en SSPM se ve limitada por no cumplir con todas las condiciones necesarias.

Por otro lado, se han hecho muchos intentos para determinar el balance de agua del suelo, basados en métodos directos, es decir, en las mediciones de lluvia, escurrimientos, percolación, y evapotranspiración (Rosenberg, 1974, citado por Barbour *et al.*, 1987). Sin embargo, la medición exacta de todos los parámetros necesarios para calcular esas propiedades es difícil tecnológicamente.

En los métodos directos se han usado, durante muchos años, unidades de suelo aislado conocidas como lisímetros (Harrold, 1969). Los hay de muchos tipos y tamaños, pero aún hace falta más desarrollo tecnológico en estos instrumentos, como bien lo señaló Harrold (1969): "Científicos que trabajan con lisímetros y sus datos, deben estar conscientes de sus limitaciones y deben esforzarse en mejorar su diseño, construcción, y técnicas operacionales".

Ante este panorama, en el presente estudio se pretende tener una visión de lo que es el balance hídrico de SSPM utilizando tecnología habitual como lo es la sonda de neutrones (ver metodología) y se evalúa la aplicación de un lisímetro sencillo y barato.

2 ANTECEDENTES

El balance de agua del suelo es afectado por factores de la atmósfera, del suelo y de las plantas (Ritchie, 1981b). Estos factores son interdependientes, pero se discutirán separadamente por simplicidad. Primero se presentan algunas consideraciones teóricas de los componentes más singulares del balance hídrico. En seguida se pretende dar una panorámica de lo que se conoce sobre el tema y sobre todo de aquellos conocimientos que nos ayuden a explicar y comparar los resultados del presente trabajo.

2.1 Precipitación.

Reyes y Rojo (1985) hicieron un estudio sobre la precipitación en todo Baja California y señalan que la mayor precipitación pluvial sucede en las montañas y que es en esas zonas donde se da la mayor variabilidad interanual. Ellos encontraron una relación directa entre la precipitación en la península y el fenómeno El Niño/Oscilación del Sur (ENOS). El evento ENOS parece ser de mayores consecuencias en las lluvias de invierno que en las de verano. Ellos mencionan, además, la falta de registros pluviométricos en la parte más alta de SSPM. Hasta antes del presente trabajo sólo había un pluviómetro funcionando en toda la sierra y de una forma muy irregular, lo cual no permitía entender la dinámica de la lluvia en SSPM; es por esta razón que, en el marco de investigaciones en el cual se ve envuelto este trabajo, se instaló una red de pluviómetros no sólo en los sitios de estudio del balance hídrico sino en otros más (Fig. 2).

2.2 Escurrimientos.

El escurrimiento ocurre cuando la precipitación excede la tasa de infiltración de agua dentro del suelo. La tasa de infiltración durante un evento de lluvia depende del modo, cantidad y distribución temporal de la lluvia durante la tormenta, además, también depende

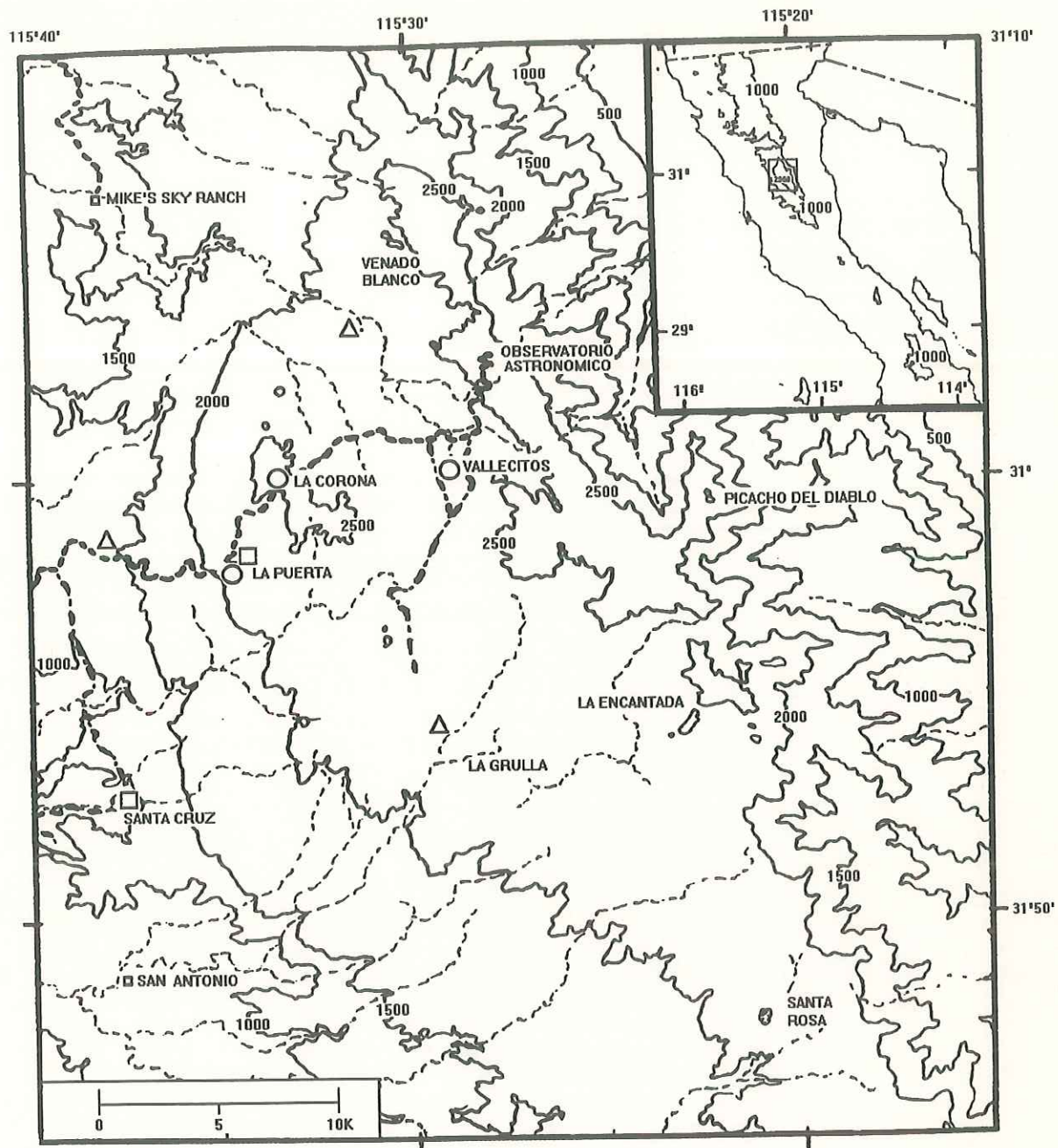


Figura 2. Mapa topográfico de la Sierra de San Pedro Mártir y ubicación de los sitios de estudio (O), estaciones pluviométricas de la SARH (□) y pluviómetros adicionales (Δ).

de la humedad previa del suelo (Lane y Barnes, 1986). Las características del suelo, tales como textura, porosidad, conductividad hidráulica, estructura, profundidad y características de la superficie afectan la tasa de infiltración. Por ejemplo, la escorrentía sobre superficies arenosas y pedregosas es comúnmente más baja que en suelos arcillosos y limosos, ya que los primeros tienen una mayor capacidad de infiltración (Noy-Meir, 1973). Por otro lado, la vegetación y la hojarasca, al interceptar la lluvia, protegen al suelo del impacto de las gotas de lluvia y conservan, así, la estructura edáfica y la capacidad de infiltración, produciendo menor escorrentía (Cervantes-Servín *et al.*, 1988). Estos aspectos se relacionan con el papel que la vegetación puede desempeñar para regular los escurrimientos y la capacidad de infiltración del suelo.

Durante la época seca, sólo una pequeña parte de la precipitación aparece como escorrentía; la mayor parte se va en reabastecer el disminuido almacenaje de agua del suelo. En cambio, durante períodos con precipitación arriba de lo normal, las partes de las cuencas que raramente contribuyen al flujo de los arroyos se hacen consistentes generadores de escorrentía (Satterlund y Adams, 1992).

Los suelos congelados agregan más variables a los problemas de infiltración (Ritchie, 1981b; Satterlund y Adams, 1992). Por ejemplo, Kane y Stein (1983) mencionan que dependiendo del contenido de humedad del suelo antes del derretimiento de la nieve se pueden observar toda una gama de tasas de infiltración para cada tipo de suelo. En suelos secos se pueden apreciar tasas altas de infiltración, mientras que en suelos congelados éstas son más bajas.

2.3 Drenaje.

El agua que se infiltra en la superficie del suelo, o es almacenada o continúa moviéndose a través del suelo (Satterlund y Adams, 1992). Cuando pasa la zona de distribución principal de las raíces se le conoce como drenaje.

La tasa de percolación o drenaje, está determinada por la mayoría de los factores que delimitan la tasa de infiltración en el suelo. El movimiento de agua en la fase líquida en el suelo está determinado por el gradiente hidráulico y por la conductividad hidráulica. Estos son fijados, en gran medida, por características del suelo tales como textura, estructura, porosidad, y contenido de humedad precedente (Lane y Barnes, 1986).

A causa de que la percolación puede resultar en movimiento lateral que contribuye en ríos intermitentes o perenes, es a menudo incluída como escorrentía en la ecuación del balance hídrico cuando los cálculos son hechos en una base mensual o anual.

2.4 Evaporación.

En general se reconocen dos fases básicas de evaporación del suelo: I) Una fase limitada por la energía, cuando el agua está libremente disponible en la superficie como para satisfacer cualquier demanda evaporativa de la atmósfera. II) Una fase de secamiento cuando la evaporación es limitada por la humedad del suelo. A medida que el suelo se seca la evaporación disminuye rápidamente, ya que la conductividad hidráulica de un suelo insaturado es menor a menor contenido hídrico y esto limita su pérdida hacia la atmósfera (Rose, 1968; Satterlund y Adams, 1992). La evaporación decrece aún más rápidamente cuando el suelo tiene libre drenaje o contiene raíces absorbentes.

Una vez que la capa superficial del suelo empieza a secarse, se limita cada vez más la evaporación en las capas más profundas. Por lo tanto, la evaporación disminuye

rápidamente hasta llegar a una tasa muy lenta antes de que el suelo sea secado a una profundidad significativa. La capa superficial en secamiento, actúa como una barrera entre la energía termal y la humedad que todavía permanece en el suelo pero a mayor profundidad, evitando que la evaporación sea rápida y fuerte. Sin embargo, las plantas actúan como un mecanismo que conduce agua de la zona de la raíz hacia la zona de energía que está en contacto con el dosel, secando el suelo a mayor profundidad.

Por ejemplo, en climas áridos los 5 ó 10 cm superiores se secan mayormente dentro de 5 a 25 días y las plantas tiene poca oportunidad de extraer agua de esta capa. Toma muchas semanas para que la evaporación seque la capa de 10 a 30 cm de manera que las raíces pueden competir efectivamente con la evaporación durante algún tiempo en esa zona (Noy-Meir, 1973).

2.5 Transpiración.

Para la fotosíntesis de las plantas terrestres es fundamental captar dióxido de carbono gaseoso. Esto se lleva a cabo, principalmente, a través de las hojas que proporcionan un medio de intercambio de gases entre los tejidos internos y la atmósfera. La consecuencia inevitable es la pérdida de agua por evaporación. A la evaporación de agua por las hojas y cualquier otro tejido de la planta, se le conoce como transpiración (Bidwell, 1979; Rutter, 1975).

El agua así perdida debe de recobrase continuamente por absorción y transporte desde el suelo. El agua se mueve por la planta penetrando por las raíces y saliendo por las hojas en respuesta a un gradiente de potencial hídrico que disminuye continuamente desde el suelo hacia la atmósfera (Bidwell, 1979).

La absorción de agua por las raíces y la transpiración pueden considerarse como dos eslabones en un proceso encadenado en el cual grandes cantidades de agua son transferidas del suelo al aire a través de las plantas, con un cambio de fase líquida a gaseosa en la hoja. Este sistema es llamado el continuo suelo-planta-atmósfera (Rutter, 1975). En ese sentido, el estrés de agua de la planta puede ser inducido por: 1) una deficiencia de suministro de agua en la zona de las raíces, y 2) por una demanda excesiva de agua atmosférica en las hojas (Ritchie, 1981b).

Como la transpiración es un proceso parcialmente controlado por los estomas, entonces los factores que afectan la apertura estomática afectan la transpiración. Estos, así como los que afectan directamente a la transpiración son: la humedad del suelo, humedad relativa, velocidad del viento y la diferencia de temperatura entre la hoja y la atmósfera, entre otros (Bidwell, 1979). Aún con una misma composición florística, la transpiración de los bosques puede variar con la edad, densidad del dosel, estratificación, y otros aspectos de la estructura (Rutter, 1968).

El suelo en secamiento lleva a una restricción de la transpiración, pero la tasa de transpiración responde de diferentes maneras según las variaciones del clima, y de factores de la planta y el suelo. Se reconocen tres formas: 1) la tasa de transpiración se mantiene a una tasa potencial máxima hasta que se agota el agua disponible; 2) la tasa de transpiración comienza a declinar en algún estado intermedio, y 3) la tasa de transpiración declina progresivamente (aunque no necesariamente en una forma lineal) en todo el rango de disponibilidad de agua (Rutter, 1975).

En los estudios del balance hídrico generalmente se consideran juntas la transpiración y la evaporación del suelo, lo cual se conoce como evapotranspiración (ET). En una recopilación bibliográfica hecha por Rutter (1968) se reporta que la ET varió de alrededor de 250 mm a 950 mm anuales en trabajos realizados en bosques caducifolios, de coníferas,

mixtos y en chaparral. Por otra parte, en ese mismo trabajo se menciona un resultado en selva tropical de 1570 mm de ET anual. En contraste, en zonas áridas o semiáridas la ET varía de 250 a menos de 100 mm anuales (Franco-Vizcaíno, en prensa). En estas zonas toda la humedad del suelo se pierde por evaporación o transpiración haya o no haya vegetación (Cable, 1980); las plantas tienen que competir con la evaporación sobre todo en las capas más profundas.

Para el Sur de California Rutter (1968) reporta valores de ET desde 392 a 648 mm en bosques de coníferas y chaparral. Arkley (1981) considerando la roca intemperizada en varios sitios de bosque de coníferas mixto en las montañas de San Bernardino encontró valores de ET que caen dentro del mismo rango.

2.6 Humedad del suelo.

El almacenamiento de agua en el suelo es lo que permite que la transpiración siga por varios días sin recarga por lluvias. Sin embargo, no toda el agua que entra al suelo puede ser utilizada por las plantas. Una parte puede drenarse fuera de la zona de las raíces, mientras que por otro lado, en un suelo en secamiento, parte del agua almacenada está retenida fuertemente por las partículas del suelo (Ritchie, 1981a, 1981b). Es decir, existen límites en cuanto a disponibilidad de agua del suelo para las plantas. La cantidad de agua que los suelos pueden almacenar se limita a 50-250 mm por metro de profundidad (Rutter, 1968). Cuando se utilizan la capacidad de campo y el punto de marchitez permanente para establecer los límites superior e inferior, se le conoce como "agua disponible" al almacenamiento útil para las plantas. Sin embargo, Ritchie (1981a) sugiere que para tener mejores estimaciones del balance de agua del suelo es importante medir el límite superior e inferior de disponibilidad de agua del suelo en el campo. El le ha llamado "agua extraíble" al

almacenamiento útil determinado a partir de mediciones del contenido hídrico. El recomienda la sonda de neutrones para estas mediciones. Sin embargo, ahora se utiliza mucho la técnica "time-domain reflectometry" (TDR).

El agua se mueve a través del suelo (y a través de todo el continuo suelo-planta-atmósfera) en respuesta a gradientes de potencial hídrico (Ψ); moviéndose siempre de un potencial alto a uno bajo (Satterlund y Adams, 1992). El potencial hídrico total del suelo consiste de la suma de varios potenciales:

$$\Psi_{total} = \Psi_{gravedad} + \Psi_{mátrico} + \Psi_{osmótico} + \Psi_{presión}$$

El primer potencial es debido a la fuerza de gravedad y siempre actúa hacia abajo. El potencial mátrico es consecuencia de las fuerzas de adhesión entre el suelo y el agua y las fuerzas de cohesión entre las moléculas de agua. Es el principal responsable de que el suelo retenga el agua. El potencial osmótico resulta de diferentes concentraciones de solutos en el agua. Por último el potencial de presión representa la fuerza ejercida por el peso de una columna de agua en el punto de medición.

La conductividad del agua en el suelo (conductividad hidráulica) decrece en muchos órdenes de magnitud a medida que el contenido de agua es reducido (Rutter, 1975; Satterlund y Adams, 1992).

Miller *et al.* (1983) afirman que la sequía de verano de climas mediterráneos es definida más claramente por la poca humedad del suelo, en ese período, que por la precipitación. Ellos encontraron que la sequía en Echo Valley California empezó a principios de julio en casi cada año.

En Arizona, donde las lluvias de verano son más abundantes que las de invierno, Cable (1980) encontró que la humedad del suelo penetró más profundo y duró más tiempo en invierno que en verano. Atribuyó este patrón a: 1) las intensidades de las lluvias de invierno no exceden, normalmente, la capacidad de infiltración de los suelos mientras que

las lluvias de verano sí; 2) las pequeñas gotas características de las lluvias invernales caen a menores velocidades y resultan en una menor salpicadura y sellamiento de la superficie del suelo que las de verano, y 3) la demanda de evaporación es mucho menor en invierno.

La humedad del suelo quizás no sea la única o principal fuente de agua para los bosques de la Cordillera Peninsular. Arkley (1981) encontró que los bosques del Sur de California consumen agua almacenada en la roca intemperizada y argumenta que quizás la productividad y sobrevivencia de los árboles de bosques de climas con sequía en verano dependan de la humedad almacenada a gran profundidad en roca intemperizada. Por otro lado, Jones y Graham (1993) encontraron que la roca intemperizada de montañas del Sur de California es porosa, tiene buen drenaje y puede conservar cantidades apreciables de agua disponible para las plantas.

2.7 Métodos.

Como ya se vio en la Introducción, la medición del balance hídrico es cara y tecnológicamente difícil. Una forma relativamente accesible de medir el balance hídrico del suelo, es determinando indirectamente la evapotranspiración de un área por medio de mediciones del contenido hídrico del suelo (Rutter, 1968; Gavande, 1982; Harrold, 1969). Cuando el suelo ha sido reducido abajo de su capacidad de campo, la evapotranspiración es estimada frecuentemente de la suma de la lluvia más la disminución de la humedad del suelo menos cualquier escorrentía que suceda. Sin embargo, Rutter (1968) menciona como posibles fuentes de error: la calibración de los aparatos que miden la humedad del suelo, el suponer que el drenaje es insignificante y el que no se muestree la profundidad completa de las raíces. En períodos secos cuando las capas inferiores no tienen agua disponible para drenar y no existe escorrentía, este método se hace más confiable.

Recientemente se han hecho varios estudios sobre la humedad del suelo utilizando la sonda de neutrones, y a partir de eso se estima la evapotranspiración (e.g. Ng y Miller, 1980; Carbon *et al.*, 1982; Joffre y Rambal, 1993; Cable, 1980). En algunos de ellos se calcula la escorrentía, evaporación y drenaje a partir de los datos de humedad del suelo y de otras características de los suelos como conductividad hidráulica y retención de humedad. A veces se utilizan los valores de la evapotranspiración potencial. Es decir, en estos estudios no se midieron ni el drenaje ni la escorrentía, sólo se calcularon.

Rutter (1968) hizo un análisis de la metodología para medir la evapotranspiración de los bosques, desde los métodos micrometeorológicos arriba del dosel, pasando por mediciones directas en los árboles, por estimaciones de la disminución de agua del suelo, por la percolación en los lisímetros, hasta la escorrentía en las cuencas. En los estudios de cuencas se mide el escurrimiento que sale de la cuenca, que es considerado como la suma de escorrentía y drenaje, y al restarlo a la lluvia se obtiene una estimación de la evapotranspiración (Shachori y Michaeli, 1965; Rutter, 1968). En otros estudios se usan los lisímetros, que son de muchos tipos. Para el caso de pastos pueden ser chicos, pero para el caso de bosques los hay muy grandes y costosos. De estos últimos hay muy pocos en el mundo (Rutter, 1968). Los lisímetros también se pueden usar para medir únicamente la evaporación del suelo (Boast, 1986), siendo entonces muy pequeños. De hecho, como mencionó Harrold (1969), la única parte del fenómeno del transporte que puede ser medido directamente por el lisímetro, con exactitud satisfactoria, es el flujo de evaporación. El lisímetro proporciona mediciones exactas de pérdidas de agua de suelos desnudos en estudios de movimiento ascendente del agua del suelo como resultado del secamiento superficial.

2.8 La Sierra de San Pedro Mártir y el balance hídrico en la región.

Como ya se mencionó, la Sierra de San Pedro Mártir tiene características particulares que hacen interesante su estudio, no sólo en relación al balance hídrico sino también en otras áreas de la ciencia. Por ejemplo, de las montañas de la Cordillera Peninsular que tienen régimen mediterráneo es probablemente la que tiene mayor precipitación de verano. Por otro lado, en SSPM se encuentra el límite sur de distribución de varias especies de coníferas (Minnich, 1987). Además, como se ha mencionado previamente, los bosques en SSPM tienen menor densidad de árboles que las montañas del sur de California; esto ha sido atribuido al régimen de incendios, el cual es menos alterado en SSPM que en California (Barbour *et al.*, 1991).

Por compartir características climáticas, geológicas y vegetación similares las montañas del Sur de California son muy parecidas a SSPM. Arkley (1981) trabajó sobre humedad del suelo y balance hídrico en las montañas de San Bernardino, en el Sur de California. Encontró que la roca intemperizada en esa montaña almacena suficiente agua de invierno que es utilizada en verano y esto explica en gran medida la gran productividad de estas montañas a pesar de la sequía de verano. Encontró además que donde el suelo era delgado la densidad del bosque era baja; esto lo atribuyó a que las raíces se distribuyen más superficialmente y cada árbol requiere, entonces, de mayor extensión horizontal por lo que se mantienen más separados. Por otra parte, observó que en un año con lluvia apreciable tanto en mayo como en agosto se produjo mayor transpiración que en un año con precipitación invernal dos veces mayor que la normal pero con poca lluvia de verano.

Ng y Miller (1981) estudiaron la humedad del suelo y el balance hídrico en un ecosistema de chaparral cercano a San Diego (Echo Valley); aunque la vegetación es distinta el régimen de lluvias es muy parecido a SSPM. En esa zona, que está bastante estudiada,

se observó que las pérdidas por drenaje ocurren consistentemente sólo si la precipitación anual es superior de 550 mm/año (Poole *et al.*, 1981). Por otra parte el escurrimiento ocurrió sólo cuando la precipitación fue superior a 650 mm/año.

Rutter (1968) hace una recopilación de trabajos sobre evapotranspiración de bosques de todo el mundo y a los bosques y chaparrales del Sur de California los clasifica como de muy alto estrés hídrico.

En cuanto a estudios de balance hídrico del suelo en Baja California sólo conozco un trabajo en el Desierto Central de B.C. (Franco-Vizcaíno, en prensa).

3 OBJETIVOS

1. Determinar y comparar el balance hídrico en tres sitios de la Sierra de San Pedro Mártir, Baja California, los cuales representan vegetación de bosque de coníferas y de pradera, y diferentes elevaciones.
2. Estimar y comparar la evapotranspiración en estos sitios.
3. Comparar el balance hídrico entre las distintas estaciones.
4. Comparar el balance hídrico entre años con diferente cantidad y estacionalidad de lluvia.
5. Evaluar la aptitud y las fuentes de error en la técnica utilizada.

4 AREA GEOGRAFICA DE ESTUDIOS

En esta sección se describe primeramente la Sierra de San Pedro Mártir en general y después se da una descripción más detallada de los sitios de estudio.

4.1 Descripción física de la Sierra.

La Sierra de San Pedro Mártir (SSPM) forma parte de la Cordillera Peninsular que inicia en las montañas de San Jacinto, E. U. y termina hacia la mitad de la Península de Baja California, en el paralelo 28 (Gastil, 1990).

SSPM se encuentra en el noroeste de la Península de Baja California, entre los paralelos 30°30' y 31°10' de latitud norte y los meridianos 115°44' y 115°13' de longitud oeste (Fig. 2). Es la sierra más alta de la península; cuenta con altiplanicies arriba de 2000 msnm y su pico más alto es el Picacho del Diablo con 3,095 msnm (Gastil *et al.*, 1975; Delgado, 1991).

Hacia el oriente la sierra termina abruptamente en el escarpe del lado del Golfo. Es en esta zona donde se encuentra el parteaguas principal y sus máximas alturas. Este escarpe es muy espectacular: de alturas de 2800 msnm, se cae al Valle San Pedro Mártir y Valle Chico, de tan sólo 500 msnm, en una distancia de alrededor de 10 km (Fig. 3). En contraste, hacia el oeste la sierra se inclina más suavemente y es por eso que el drenaje principal de esta montaña es hacia el Océano Pacífico. Sin embargo, la parte noroeste tiene un impresionante escarpe que se levanta desde elevaciones de 1,500 a 2,250 m en 1.5 km. Este escarpe continúa hacia el sureste por 60 km, haciéndose cada vez menos evidente. Al sur de 30°45' N, ya no existe una ruptura topográfica obvia, pero la altiplanicie persiste aún.

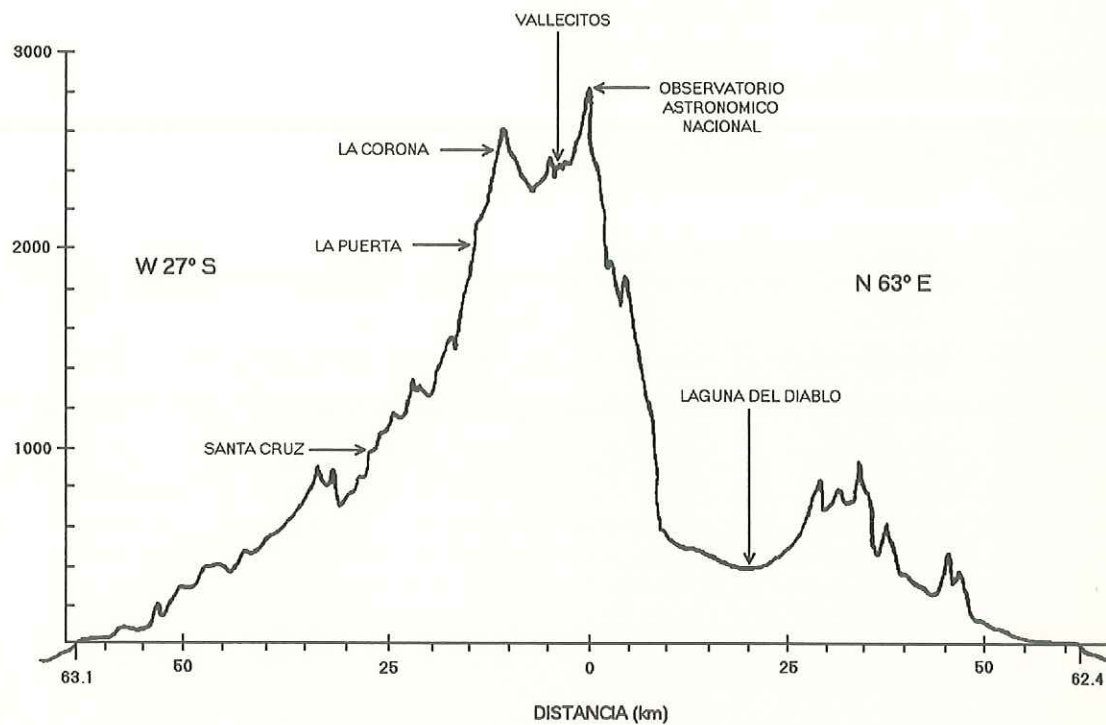


Figura 3. Sección transversal de la Sierra de San Pedro Mártir y sus vertientes este y oeste. La distancia está marcada a partir del Observatorio Astronómico Nacional (adaptado de Alvarez, 1983).

La altiplanicie está inclinada hacia el suroeste, normal al eje de la península. En su punto más amplio tiene alrededor de 15 km de ancho. La altiplanicie tiene lomeríos bajos de pendientes suaves, y es de roca granítica que subyace a una cubierta de aluvión dispersa. En su superficie hay ciénegas y valles con arroyos serpenteantes que se han desarrollado localmente.

4.2 Geología.

El plutón de SSPM es uno de los varios que conforman el batolito Peninsular. Se formó en el cretácico. Las rocas que lo constituyen son tonalita y granodiorita (Gastil *et al.*, 1975; Delgado, 1991), las cuales dominan la mayor parte de la sierra, sobre todo hacia el norte.

La intrusión magmática metamorizó rocas prebatolíticas. Por ello, hay rocas metamórficas en varias partes de la sierra. Hacia el sur de SSPM, más allá de La Grulla, las rocas más singulares son gneis y esquisto. En los alrededores del Observatorio Astronómico Nacional (sobre todo al oeste), la roca predominante es gneis.

4.3 Hidrología.

Como se mencionó en la sección 4.1, el drenaje principal es hacia el lado oeste de SSPM. En esa vertiente drenan cuatro importantes sistemas de ríos: el San Rafael y el San Telmo hacia el noroeste, el Santo Domingo hacia el suroeste, y por último, el río San Simón, que se origina a elevaciones más bajas de 2,300 msnm (Yrurentagoyena, 1992; Zúñiga, en proceso; Fig. 4). El río Santo Domingo es el único sistema que recibe suficiente agua y tiene suficiente almacenamiento en sus acuíferos para permanecer fluyendo superficialmente hacia el Océano Pacífico durante todo el año.

En el extremo norte algunos arroyos escurren hacia el Valle de la Trinidad.

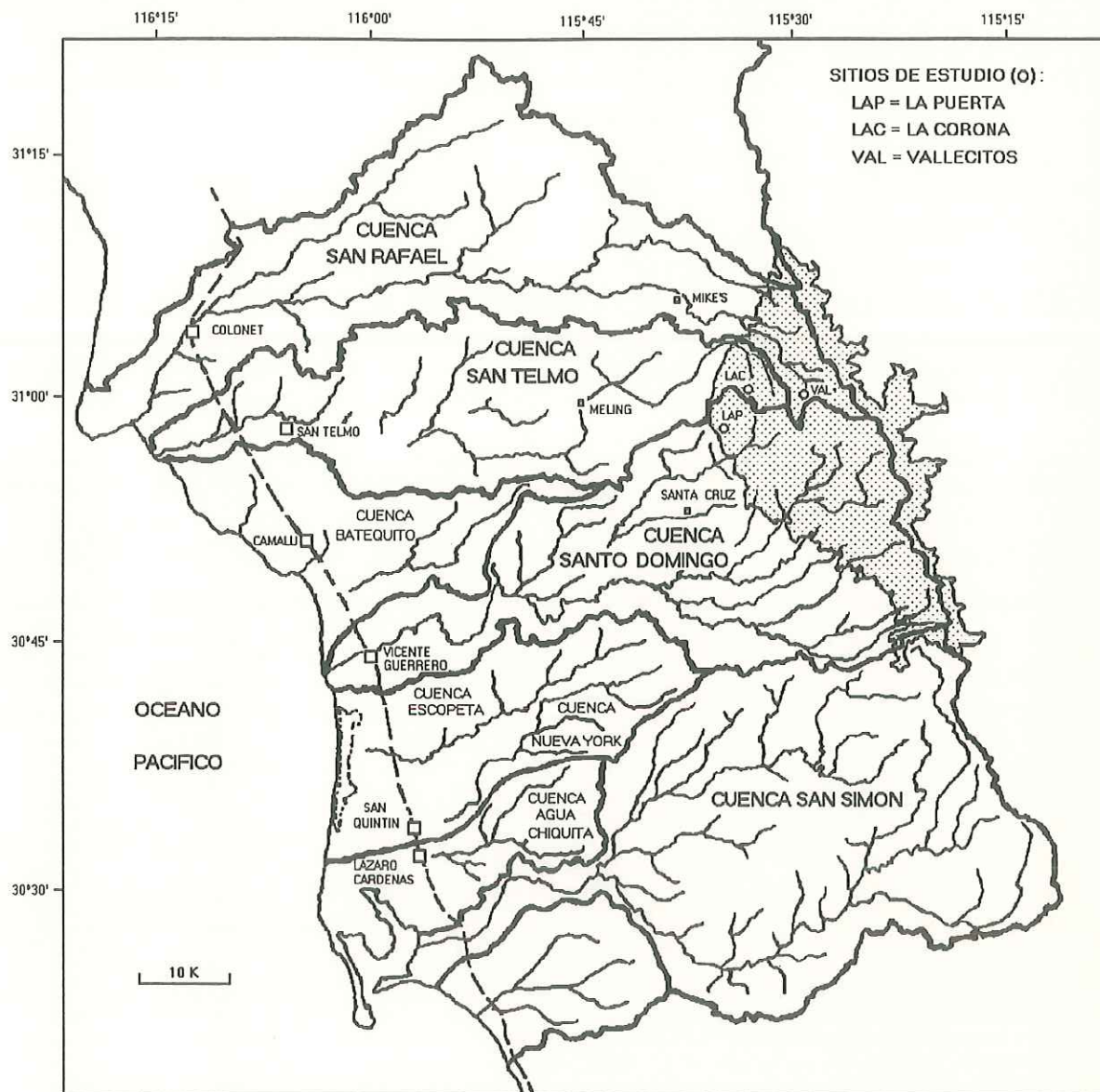


Figura 4. Familia de cuencas de la vertiente oeste de la Sierra de San Pedro Mártir. La parte sombreada representa alturas mayores de 2000 msnm (adaptado de Zuñiga, en proceso y de las cartas de INEGI).

Hacia el lado este, la sierra es drenada por numerosos arroyos que bajan desde la cresta formando cañadas profundas por todo el escarpe. Algunos arroyos tienen flujo perenne al pie de la sierra, sin embargo casi nunca llegan al mar porque se infiltran y evaporan en Valle San Pedro Mártir y Valle Chico (Espinoza, 1983).

4.4 Clima.

La península se encuentra bajo la influencia del cinturón subtropical de altas presiones (Reyes y Rojo, 1985). Esto, aparte de limitar el vapor de agua disponible, tiene como consecuencia una baja nubosidad y largos períodos de insolación, dando como resultado un clima predominantemente árido. Esta situación está parcialmente aliviada en la región del Pacífico Norte, durante invierno, donde los vientos del oeste traen asociados frentes y lluvias regulares. Además, en las montañas de esa zona se suma una apreciable precipitación en verano.

Las lluvias más copiosas del Estado de Baja California suceden en las sierras de San Pedro Mártir y de Juárez. Las grandes alturas de estas sierras afectan tanto la cantidad como la distribución de la precipitación, y tienen, además, un efecto en la estacionalidad (Markham, 1972). En invierno, cuando la humedad fluye del suroeste, hay mayor precipitación en las partes altas (debido al efecto orográfico sobre la lluvia) y se forma una sombra de lluvia en la vertiente este. En el verano sucede lo contrario; la humedad que viene del sureste (por el Golfo de California) origina lluvias convectivas en las montañas, en tanto que en la vertiente occidental no existe convección debido a la presencia de los vientos ascendentes del Pacífico (Minnich *et al.*, 1993). Entonces, en la vertiente oeste predominan casi exclusivamente las lluvias de invierno, mientras que en el este las de verano (Fig. 5). En cambio, en las partes altas de las montañas se capta precipitación apreciable de las dos temporadas lluviosas, siendo la invernal la de mayor magnitud.

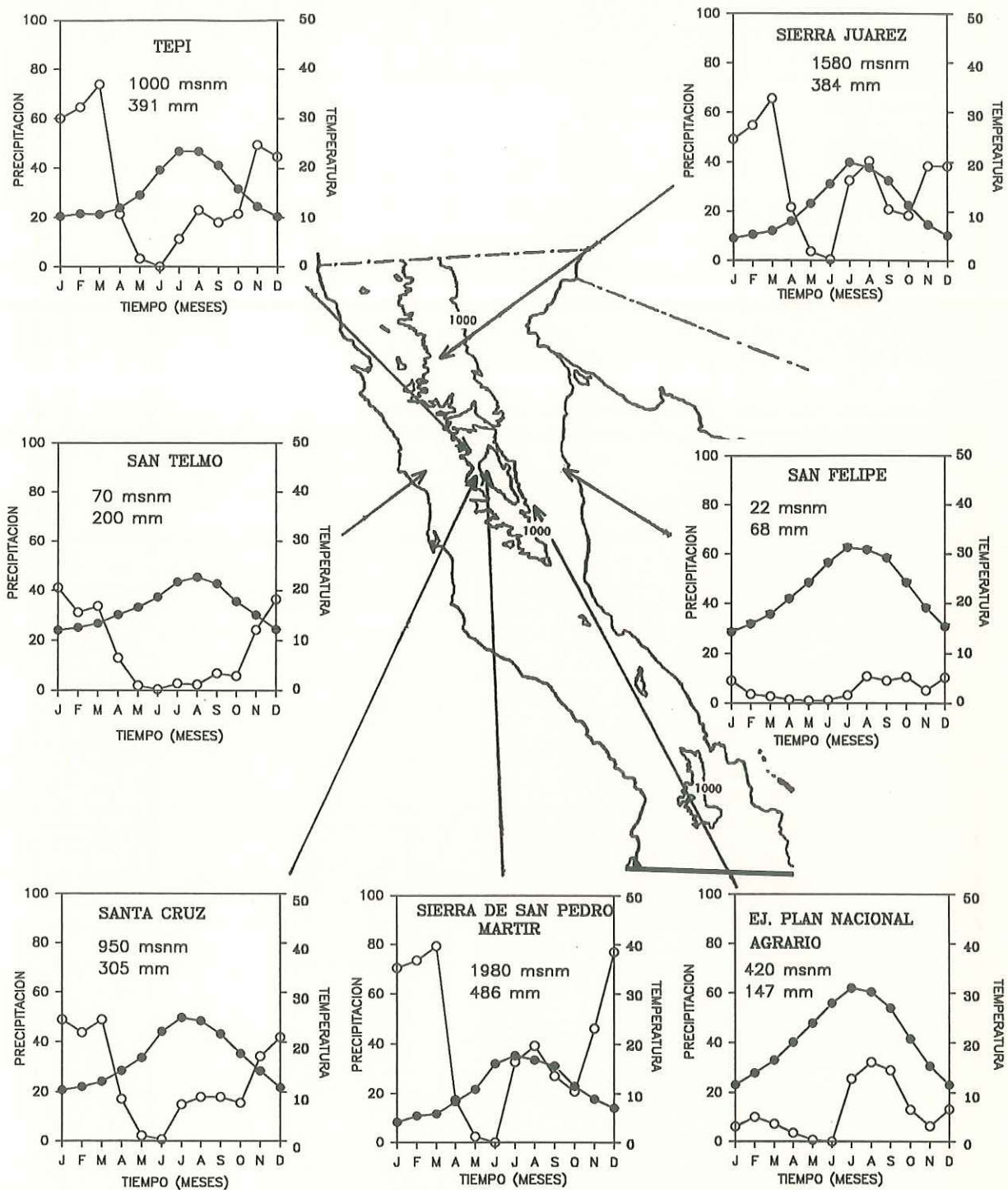


Fig. 5 Distribución de precipitación (◯) y temperatura (●) mensual en Sierra de San Pedro Mártir y sus alrededores.

El carácter de la precipitación es muy diferente en las dos temporadas lluviosas. Durante el verano (Julio-Septiembre), el margen occidental del monzón norteamericano, una capa profunda de aire húmedo tropical inestable, se extiende periódicamente hacia las sierras de Baja California (Minnich *et al.*, 1993). Estas nubes originan lluvias tipo aguaceros que a veces son torrenciales y van acompañadas de tormentas de rayos y truenos. Estas lluvias pueden durar varias horas. Durante el verano la humedad relativa normalmente permanece abajo de 40%, excepto durante los breves chubascos, es por ello que el chaparral y los bosques de pino permanecen secos. El promedio de precipitación estival sobre SSPM es de 100 a 150mm (Fig. 5). Una moderada precipitación de verano también se presenta hacia los desiertos al este de SSPM (Fig. 5). Hacia el oeste de las montañas, la precipitación de verano disminuye rápidamente hasta < 10 mm a lo largo de toda la costa desde San Quintín hasta la frontera con Estados Unidos .

En el invierno, debido a que la temperatura disminuye con la altitud (Fig. 5), en las partes altas de SSPM se logran temperaturas muy bajas. Por ejemplo, en el Observatorio Astronómico Nacional la temperatura media anual es de 7.3°C; el mes más frío (Marzo) tiene una temperatura promedio de -1.5°C y el mes más caliente (Julio) de 16.3°C (Alvarez y Maisterrena, 1977). Es debido a esta temperatura que gran parte de la precipitación de invierno en SSPM es en forma de nieve. Generalmente la precipitación se da de manera moderada pero continua, con duración de varios días. Las sierras también son responsables de las altas temperaturas que se registran en la costa del Golfo de California al bloquear el aire frío que viene del Océano Pacífico (Markham, 1972).

Ahora bien, siguiendo el sistema de clasificación climática de Köppen modificado por García, podemos mencionar a los tipos BW y BS (seco y semiseco) como los más representados en la Península de Baja California. Sin embargo, en SSPM, debido a la altitud, se dan climas excepcionales. Entre los 1000 y 2000 msnm se encuentran los climas Csa(e)

y Csb(e), templados húmedos con lluvias en invierno (climas mediterráneos), con verano cálido y con verano fresco respectivamente, y algo extremosos. A altitudes superiores a los 2000 m se localiza el clima Cs(b')(e), húmedo con lluvias en invierno, semifrío con temperatura media anual entre 5° y 12°C, con verano largo y fresco (García y Mosiño, 1968).

4.5 Vegetación.

Es en SSPM donde se encuentra la mayor diversidad de coníferas en Baja California (Delgadillo, 1992). En general podemos decir que SSPM tiene un bosque de coníferas de montaña, y asociado a éste existe un sotobosque de arbustos llamado chaparral de montaña (Hanes, 1981). Sin embargo, haciendo una descripción más detallada nos daremos cuenta de la existencia de distintas comunidades (Minnich y Franco-Vizcaíno, sin publicar; Passini *et al.*, 1989; Fig. 6).

Una gran parte del Norte de SSPM está cubierta por bosque de coníferas mixto, dominado por *Pinus jeffreyi* mezclado con *P. lambertiana* y *Abies concolor*. Estas dos últimas coníferas son dominantes en las laderas de exposición norte con pendiente pronunciada. A medida que la altiplanicie desciende hacia el sur de Vallecitos, el bosque de coníferas mixto cede su lugar a un bosque monoespecífico de *Pinus jeffreyi*, el cual se distribuye en el piso de las cuencas y en las orillas de las ciénegas, evitando las pendientes cubiertas de chaparral. Por otro lado, en las ciénegas de Vallecitos y La Tasajera son comunes los bosques sub-alpinos de *Pinus contorta* y *Populus tremuloides*. Estos bosques también se encuentran en varios arroyos hacia el oeste y en otros puntos dispersos.

Los bosques de SSPM tienen una estructura abierta, ya que cuentan con grandes espacios entre los árboles (50-150 árboles/ha). Las comunidades dominadas por *Pinus Jeffreyi* son menos densas que las otras antes mencionadas (Barbour *et al.*, 1991; Tabla I).

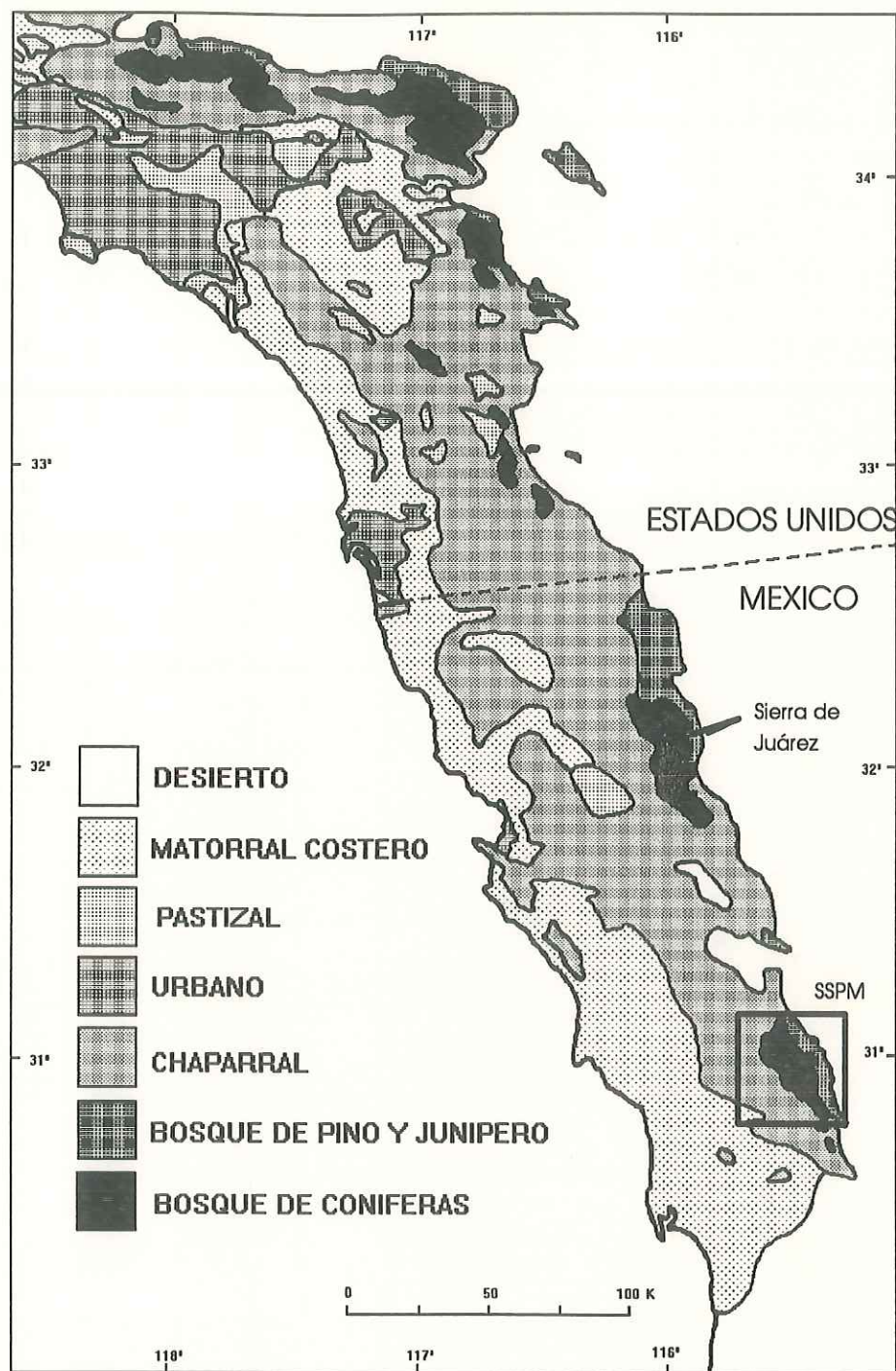


Figura 6a. Vegetación del Noroeste de Baja California y del Suroeste de California. El recuadro indica la ampliación de la siguiente página (Adaptado de Minnich, 1983).

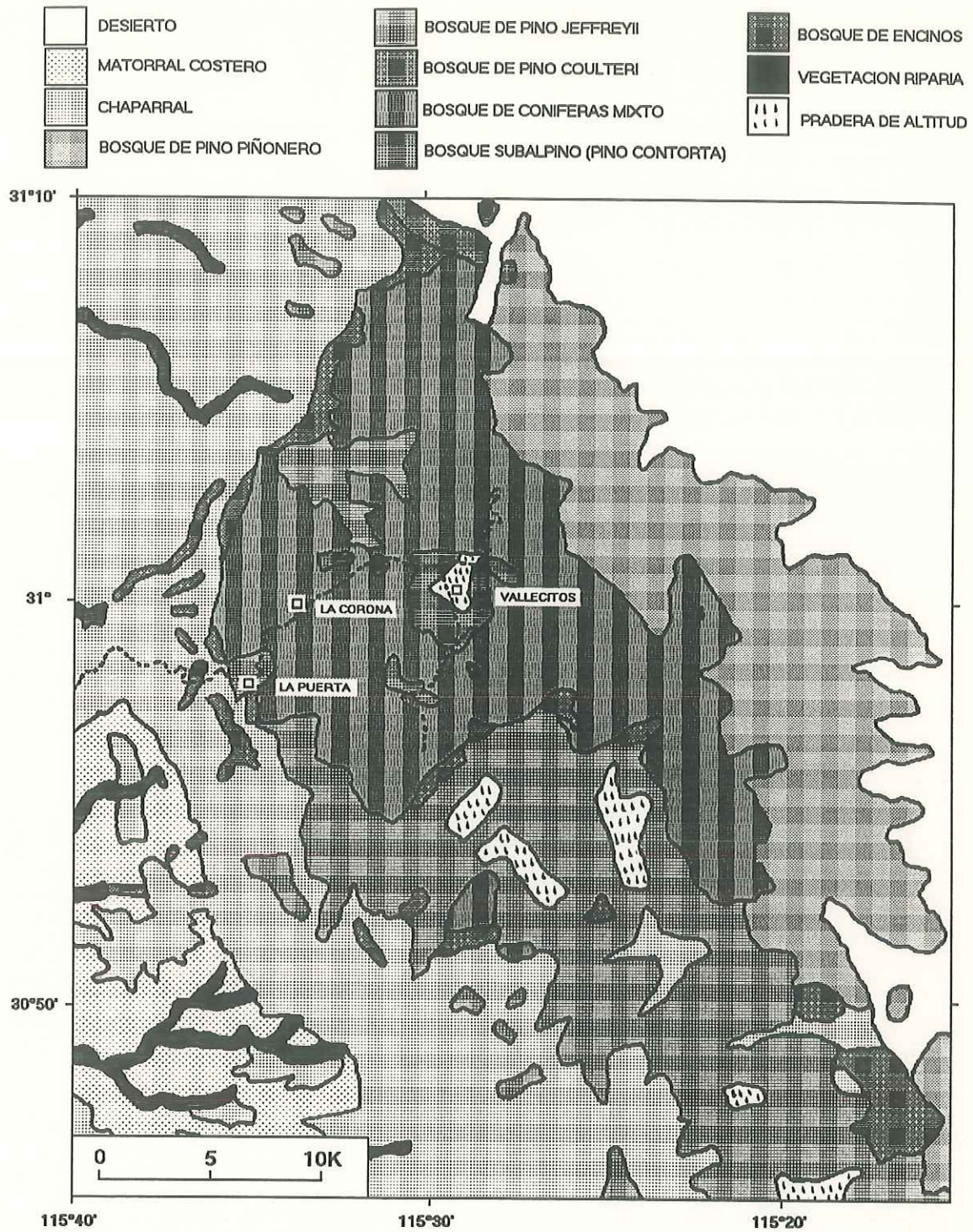


Figura 6 (continuación) b) Vegetación de la Sierra de San Pedro Mártir (adaptado de Minnich y Franco-Vizcaíno, sin publicar).

Tabla I. Características de los bosques en los sitios de estudio (adaptado de Barbour *et al.*, 1991).

Sitio	Especie arbórea	VI ^a	Densidad ^b		Area basal ^c	Cobertura		
			Arboles	Renuevos		Arbol	Arbusto	Herbáceas
La Puerta	<i>Pinus jeffreyi</i>	300	57	427	16	43	4	4
La Corona	<i>Pinus jeffreyi</i>	170	86	1089	29	86	6	5
	<i>Abies concolor</i>	130						

^aVI = valor de importancia (suma de la frecuencia relativa, área basal relativa y densidad relativa).

^bDensidad = árboles/ha ó renuevos/ha.

^cArea basal es en m²/ha.

Otro tipo de vegetación son las ciénegas o praderas de altitud. Se encuentran en algunos valles como: Vallecitos, La Grulla, Rancho Viejo, La Encantada, Santa Rosa y Santa Eulalia. Estos valles son muy explotados por el ganado.

4.6 La Puerta.

El primer sitio de estudio se encuentra cerca de la entrada del Parque Nacional (donde está el campamento principal de los forestales) sobre una pendiente con orientación al 155° (SSE) (Fig. 2, Tabla II).

Los datos de campo sugieren que el suelo es un Xeropsamments Típico con mineralogía mezclada (Graham, comunicación personal). Por el tipo de comunidades vegetales se cree que el régimen de temperatura es méxico. El suelo es derivado de residuo granítico cubierto por coluvión de colina. Roca granítica intemperizada intacta, que se puede partir con una espátula, se encuentra alrededor de 40 cm, y roca más dura (horizonte Cr) es encontrada en alrededor de 60 cm. El suelo muestra poco desarrollo del perfil: el Horizonte O es delgado (<2 cm); las texturas son relativamente uniformes y van de arenoso-franco a franco-arenoso; el Horizonte A es gris pardo muy oscuro y el Horizonte C de pardo a gris pardo oscuro, ambos con débil desarrollo estructural. No existen películas de arcilla. En la Tabla III se presentan algunas características de los suelos de los tres sitios de estudio en los 30 cm superficiales.

La vegetación es bosque monoespecífico de *Pinus jeffreyi* (bosque bajo; Fig. 6); con una menor densidad y menor cobertura que el bosque de La Corona (Tabla I). En cuanto a especies arbustivas sobresalen *Arctostaphylos spp.* y *Rhamnus californica*.

Tabla II. Descripción de los sitios de estudio.

Sitio (Abreviación)	Localización	Elevación (msnm)	Pendiente (%)	Clasificación del suelo ^a	Vegetación
La Puerta (LAP)	30°58'05''N 115°34'47''W	1,980	8	Xeropsamments Típicos	Bosque de <i>Pinus jeffreyi</i>
La Corona (LAC)	30°59'58''N 115°33'24''W	2,470	6	Xeropsamments Típicos	Bosque de coníferas Mixto ^b
Vallecitos (VAL)	31°00'23''N 115°29'13''W	2,380	1	Haplaquepts Aéricos	Ciénega

^aRobert Graham, comunicación personal.

^b"Mixed Conifer Forest".

Tabla III. Características de los suelos en los 30 cm superficiales.

Sitio de estudio	Capa (cm)	pH ^a	Salinidad ^b (dS/m ³)	Carbono orgánico ^c	Distribución de partículas ^d			Textura
					Arena	Limo	Arcilla	
La Puerta	0-6	6.4	0.20	1.81	87.2	11.0	1.8	Arena
	6-30	6.8	0.18	1.09	82.1	15.2	2.7	Arena franca
La Corona	0-5	6.9	0.18	1.34	83.3	13.6	3.1	Arena franca
	5-30	6.5	0.28	1.05	79.9	14.3	5.9	Arena franca
Vallecitos	0-7	6.4	0.52	1.86	53.8	30.2	16.1	Franco arenoso
	7-30	6.3	0.22	0.75	61.4	24.2	14.4	Franco arenoso

^aEn la pasta de saturación; ^bEn el extracto de saturación; ^cPor el método de Walkley y Black; ^dPor el método del hidrómetro de Bouyoucos.

4.7 La Corona.

El segundo sitio de estudio se encuentra en la parte alta de la Sierra La Corona, dentro del Parque Nacional (Fig. 2, Tabla II).

El suelo es muy parecido al de La Puerta (Graham, comunicación personal; Tabla III). Los datos indican que el suelo es Xeropsamment Típico con mineralogía mezclada. A diferencia de La Puerta se cree que el régimen de temperatura es frígido. Además, existen películas de arcilla que van de delgadas a moderadamente gruesas en la roca intemperizada de los horizontes C y Cr.

El área está cubierta por bosque de coníferas mixto (bosque alto) del tipo *Abies-Pinus* (Fig. 6). En la Tabla I podemos observar que el bosque es más denso y con mayor cobertura que en La Puerta. Entre otras especies arbustivas se encuentra *Arctostaphylos sp.*; y en cuanto a herbáceas tenemos a *Lupinus sp.* y *Astragalus sp.* como representantes.

4.8 Vallecitos.

El tercer sitio de estudio se instaló en una ciénega (pradera de montaña) del lugar conocido como Vallecitos a ± 1 km del camino al Observatorio, siguiendo la brecha a La Tasajera (Fig. 1; Tabla II). El suelo se ha formado en aluvión que llena un valle derivado de roca granítica (Graham, comunicación personal). Sus propiedades parecen ser fuertemente influenciadas por los pronunciados gradientes en humedad: desde lo húmedo de las ciénegas centrales bajas, pasando por las ciénegas del margen, ligeramente más altas y más secas, hasta lo seco de las "islas de bosque de *Pinus contorta*". Los lisímetros y tubos de acceso están en la parte central baja y húmeda de la ciénega. El suelo examinado en esta posición el 23 de junio de 1992 tenía la tabla de agua a 60 cm, lo cual limitó la profundidad de la descripción del perfil. El suelo parece ser un Haplaquept Aérico, reflejando moderado desarrollo del perfil (horizonte cámbico), y un perfil que es saturado con agua durante la

temporada húmeda, pero tiene un período relativamente corto de condiciones reductoras (régimen de humedad ácuico, subgrupo aérico). Su textura franco-arenosa se distribuye uniformemente a lo largo de todo el perfil. El suelo en este sitio tiene una profundidad mayor a 150 cm (durante la instalación del equipo nosotros lo perforamos hasta 150 cm sin ningún problema, pero no se sabe la profundidad real).

Las especies dominantes en Vallecitos son: *Trifolium wigginsii*, *Aster adscendens*, *Potentilla wheeleri*, *Agrostis diegoensis*, *Eleocharis pauciflora*, *Juncus mexicanus*, *Muhlenbergia richardsonis* (Barbour *et al.*, 1991; Montes, comunicación personal).

5 METODOLOGIA

Se trabajó únicamente con los componentes más singulares del balance hídrico. Estos se determinaron por medio de medición directa o indirecta, y en algunos casos se calcularon a partir de fórmulas generales. Los componentes que medimos fueron: precipitación, drenaje, almacenaje y, en algunas fechas, el escurrimiento; mientras que la evapotranspiración fue calculada sustituyendo los demás componentes en la fórmula general del balance hídrico.

5.1 Procedimiento para medir la precipitación (*P*).

En cada uno de los tres sitios de estudio, así como en otros más (Fig. 2), se instaló un pluviómetro de medida estandar (de alrededor de 20.32 cm de diámetro). Se ubicaron en lugares abiertos para que quedaran expuestos a la lluvia y no bajo las copas de los pinos, tratando de evitar la intercepción por la vegetación.

Como la visita a los sitios se realizó cada 15 días, o cada mes en el caso de los inviernos, el agua de lluvia acumulada estaría expuesta a la evaporación durante ese período. Para evitar esto, después de que se medía la precipitación y se vaciaba el contenido del pluviómetro, se agregaba suficiente aceite mineral hasta formar una capa que cubría el fondo. El aceite permite que el agua de lluvia se acumule en el fondo, ya que es menos denso, e impide la evaporación. Para medir la lluvia se mete la regla calibrada dentro del pluviómetro, y la altura de la columna de agua, que está justo debajo de la capa de aceite, se registra como precipitación.

En el invierno, aparte de agregar aceite, se añadió anticongelante, ya que éste derrite la nieve y mantiene el agua en estado líquido. A la medición en esta época se le resta el contenido conocido de anticongelante.

5.2 Procedimiento para medir el drenaje (D_{lis}).

En cada sitio se construyeron dos mini-lisímetros, separados ± 10 m uno del otro. A un barril de plástico de 200 l se le pegó la mitad de otro barril más pequeño (± 60 l) en la parte inferior (Fig. 7), el cual recibe y almacena el agua que se drena a través del suelo del barril grande. Entre el bote grande y el chico hay comunicación a través de varios orificios (de alrededor de 0.5 cm de diámetro) que se hicieron en el fondo del bote grande. En el fondo del barril chico se pegó uno de los extremos de una manguera. La manguera sale hacia afuera del lisímetro y alcanza la superficie del suelo, justo a un lado del barril grande. Todo este sistema se enterró en el suelo; en el caso de los sitios de bosque fue necesario perforar la roca para colocar el bote almacenador de agua. En el bote grande se puso una malla de plástico con una luz de ~ 1 mm, y encima de ésta se agregó una capa de 5 cm de espesor de grava suelta de 2 a 5 mm de diámetro (esta capa de grava permite la filtración de agua deteniendo el movimiento de partículas de suelo). El bote grande se llenó con el mismo suelo que se desocupó para hacer el hoyo, poniéndolo por capas, tal y como estaba en el estado natural. La orilla del bote grande se dejó sobresalir unos cuantos centímetros del nivel del suelo para evitar la escorrentía. Se enterró, además, un tubo de acceso para la sonda de neutrones (tubo de PVC de 5.08 cm de diámetro) dentro del mini-lisímetro para así determinar la humedad del suelo.

La manguera es el conducto por el cual se puede succionar el agua drenada. Por lo tanto, para medir el drenaje profundo se desentierra esta manguera, se conecta a una bomba de succión, y se saca toda el agua drenada durante el período entre monitoreos. El agua se recibe en un bote de 20 l y posteriormente se mide el volumen total en probetas de 1 l a una precisión de ~ 5 ml.

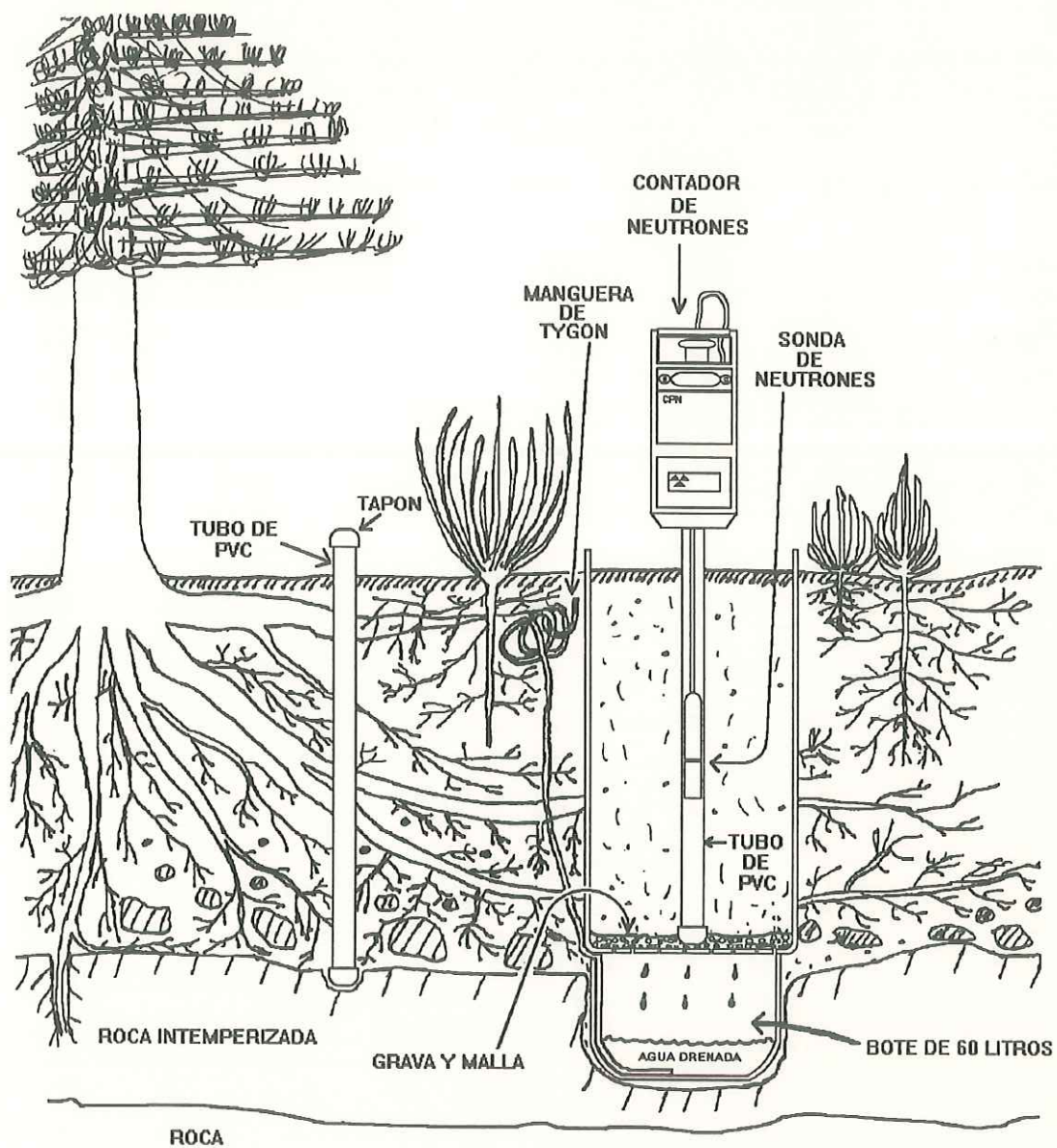


Figura 7. Esquema del lisímetro y de los tubos de acceso para la sonda de neutrones.

En cada visita se eliminaba manualmente cualquier planta que se empezaba a desarrollar dentro del mini-lisímetro. Con esto se evita la pérdida de humedad por transpiración dentro del aparato.

5.3 Procedimiento para medir la humedad del suelo (A_{lis} , A_{suelo}) y calibrar la sonda de neutrones.

En la actualidad, uno de los métodos indirectos más comunmente usado para medir el contenido hídrico del suelo es el de la dispersión de neutrones (Kramer, 1969; Payne y Dincer, 1969). Las ventajas del método son la exactitud y la rapidez de la lectura, pudiéndose hacer lecturas duplicadas a intervalos de 20 cm hasta una profundidad de 180 cm en 15 minutos, y la posibilidad de hacer lecturas múltiples en espacio y tiempo, sin causar alteraciones al suelo o a la vegetación (Gardner, 1986; Gavande, 1982).

Para la determinación de la humedad del suelo se utilizó una sonda dispersora de neutrones (Hydroprobe Moisture Depth Gauge) modelo 503 de la compañía Campbell Pacific Nuclear Corporation (Martinez, California, E.U.).

Siempre que se usa material radioactivo es necesario tomar ciertas precauciones; en nuestro caso, cumplimos con las medidas de seguridad sugeridas en el manual de la sonda de neutrones y las que propone Gardner (1986).

Para que la sonda pueda penetrar en el suelo se requiere de la instalación de tubos de acceso, los cuales fueron de PVC de 5.08 cm de diámetro. Con un barreno tipo Riverside de 8 cm de diámetro se hicieron los hoyos de 100 a 120 cm de profundidad, esto cuando la profundidad del suelo lo permitió, y se introdujeron los tubos de PVC con tapones en los extremos. El tapón del extremo inferior del tubo, el cual queda enterrado, se pegó y se

selló bien para evitar entrada de agua; el otro se mantuvo despegado de manera que el tubo se pudiera tapar y destapar. El extremo superficial del tubo se dejó a 10 cm por encima del nivel del suelo.

Cada mini-lisímetro fue equipado con un tubo de acceso para sonda de neutrones (Fig. 7). Se instalaron, además, dos tubos de acceso adicionales en el suelo a una distancia de 10 metros a cada lado de los mini-lisímetros. Esto nos permite determinar, por lo tanto, la humedad del suelo dentro de los lisímetros (A_{lis}) así como afuera de ellos en el suelo sin disturbio (A_{suelo}).

Durante el monitoreo se tomaron primero lecturas estandar de la sonda de neutrones, es decir sin sacar la sonda de su compartimiento. Posteriormente, bajando la sonda dentro del tubo de PVC, se tomaron lecturas por duplicado a intervalos de 20 cm hasta la profundidad que el tubo de acceso permitía.

La lectura estandar de la sonda es la base para la estimación del contenido hídrico.

La razón:

$$R = \text{lectura en el suelo} / \text{lectura estandar}$$

es proporcional al contenido de hidrógeno del suelo. El contenido de hidrógeno puede variar tanto por el estado de humedad del suelo como por la composición química de un suelo o capa en particular. Por lo tanto, la sonda tiene que ser calibrada para cada sitio, esto es correlacionar R con el contenido hídrico del suelo determinado gravimétricamente (Gardner, 1986). El procedimiento es el siguiente: Con el barreno (tipo Riverside de 8 cm de diámetro) se obtuvieron muestras de suelo de 500 g en cada intervalo de 20 cm; se pesaron en una balanza granataria "OHAUS" (nivelada, calibrada y protegida del viento) en el mismo campo. En el laboratorio las muestras se secaron en una estufa de presión de aire "BLUE M" a 105-110°C por 24 horas; se les permitió enfriar en un desecador y se volvieron a pesar. La pérdida de agua es el contenido de humedad.

Simultáneamente al muestreo de suelo en el campo, se tomaron lecturas con la sonda. Para la curva de calibración de la sonda se requirieron 3 ó más determinaciones (simultáneas con la sonda y gravimétricas) a diferentes contenidos hídricos (θ), es decir captando el rango desde suelo húmedo hasta suelo seco. Entonces se determinó la relación funcional entre R y θ_g (contenido hídrico gravimétrico). Con esta relación se puede calcular, indirectamente, el contenido hídrico gravimétrico para cualquier medición de la sonda para ese suelo en particular.

Para calcular el contenido hídrico volumétrico (θ_v) se utilizó la relación:

$$\theta_v = (\rho_{suelo}/\rho_{agua})\theta_g \quad (2)$$

donde ρ_{suelo} es la densidad aparente del suelo, y ρ_{agua} la densidad del agua ($\rho_{agua} = 1$; Gardner, 1986). La densidad del suelo es:

$$\rho_{suelo} = kg_{suelo}/l_{suelo} \quad (3)$$

Para conocer peso y volumen del suelo en cada sitio se procedió de la siguiente manera. Con un barreno se muestreó el suelo de cada intervalo de profundidad. Resultó mejor trabajar cada profundidad en un hoyo distinto que trabajar todas a la vez en el mismo hoyo, ya que el constante roce del barreno sobre las paredes del hoyo afectan la medición de la densidad. El roce, sobre todo en suelos no consolidados, (1) agrega más partículas (mayor peso) a las capas profundas, y se hace más evidente conforme se aumenta en profundidad, y (2) aumenta el volumen en las capas superiores que pierden esas partículas. Se secó la muestra en la estufa a 105-110°C por 24 horas, y luego de enfriarse en un desecador, se pesó en una balanza granataria. Por otra parte, con probetas de 1 l se midió el volumen de arena seca requerida para llenar cada intervalo de profundidad en el hoyo (Franco-Vizcaíno, en prensa).

Aunque en el manual de la sonda de neutrones se proporcionan calibraciones de la sonda, es mejor hacer calibraciones en el sitio de estudio (Carijo y Cuenca, 1993; Cuenca, 1988). Se requiere una curva de calibración para cada sitio o capa que tenga diferente densidad y/o composición de H (hidrógeno) lo cual está dado principalmente por la materia orgánica. Además se requiere de una curva de calibración distinta para los 15 cm superiores del suelo ya que ahí, a diferencia de las capas más profundas, se pierden una gran cantidad de neutrones hacia la atmósfera (Cuenca, 1988). Tomando en cuenta lo anterior, la significancia de la regresión y el coeficiente de correlación, se utilizaron las curvas reportadas en la Tabla IV. Cabe hacer mención que aunque la pendiente en la curva 60-80 dentro de los lisímetros en La Puerta y La Corona no resultó significativa al nivel del 5%, la empleamos porque teóricamente nos resulta mejor que usar, ya sea o la curva de la capa inmediata superior a ésta, o una sumatoria de todas las capas. Esta capa en particular tiene características muy singulares. Abajo del bote con suelo hay un reservorio que no contiene suelo y por lo tanto hay una pérdida de neutrones similar que en la capa superior.

Para el cálculo del balance hídrico se requiere conocer el agua almacenada en todo el perfil del suelo. Se utilizó la regla de Simpson (método de integración numérica) para integrar todas las profundidades, ya que se ha observado que es el mejor método (Haverkamp *et al.*, 1984).

5.4 Procedimiento para medir la escurrentía (*R*).

En el verano de 1992 instalamos tres escurrímetros en cada sitio de bosque (en Vallecitos no se colocó ninguno, ya que es un sitio sin pendiente apreciable).

Se delimitaron tres lados de una área de 1 m² con una hoja de metal galvanizado de 20 cm de ancho, de los cuales 10 se enterraron y 10 se dejaron en la superficie (Fig. 8). En el lado más bajo del escurrímeter se instaló un canal (hecho a partir de un tubo de PVC de

Tabla IV. Valores de "a" (intersección) y "b" (pendiente) de las curvas de calibración de la sonda de neutrones.

Sitio y profundidad		a	b	Probabilidad ^a	y = a + bx R ²
La Puerta ^b	0-20	-0.013	0.183	***	0.93
	20-60	-0.059	0.211	***	0.93
La Corona ^b	0-20	-0.014	0.186	***	0.82
	20-60	-0.028	0.185	***	0.54
Vallecitos ^b	0-20	-0.065	0.339	***	0.95
	20-140	-0.059	0.257	***	0.91
LAP y LAC ^c (60-80)	Dentro	0.045	0.137	0.067	0.30
	Fuera	-0.004	0.085	*	0.53

^aNivel de probabilidad de b (* = P<0.05, ** = P<0.01, *** = P<0.001)

^bCurvas de calibración combinando los datos dentro de los lisímetros y fuera de ellos (sin combinar sitios).

^cCurvas de calibración combinando los datos de La Corona y La Puerta (sin combinar dentro del lisímetro con afuera).

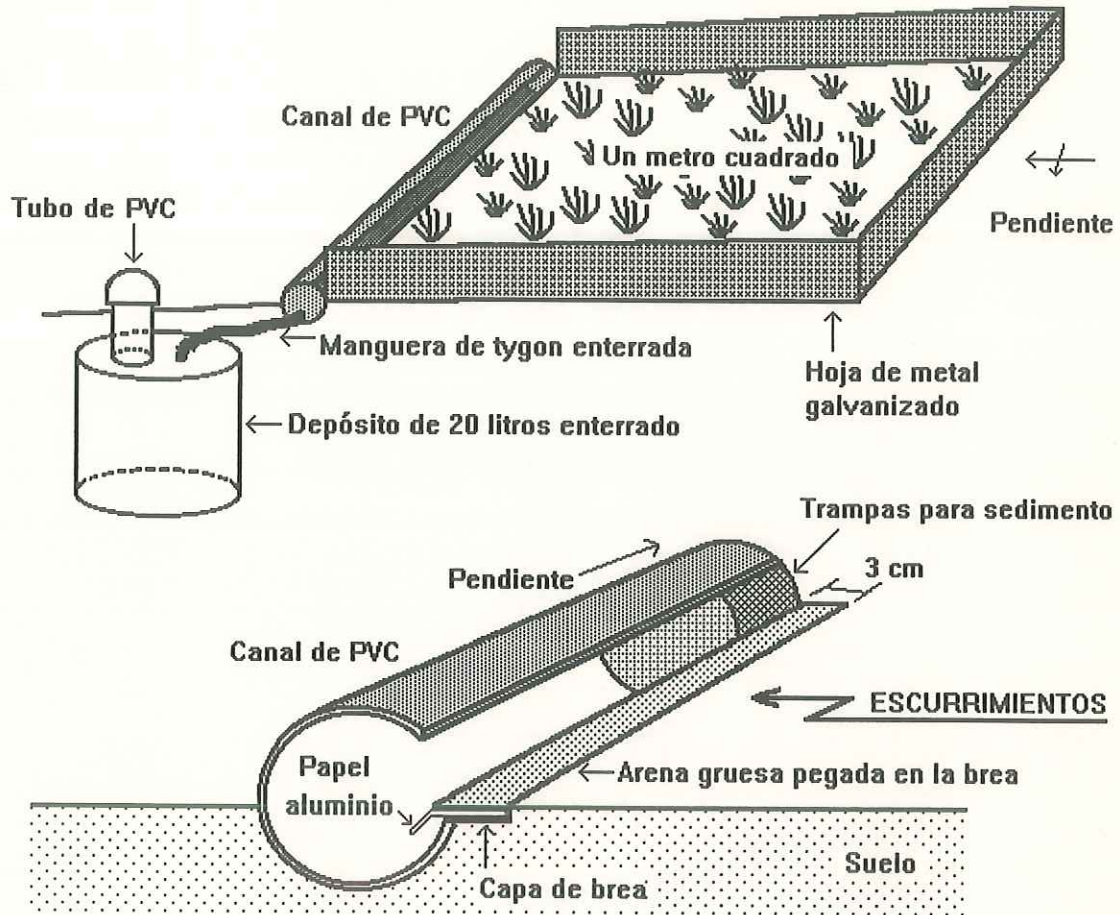


Fig. 8. Esquema del escurrímetro.

5.08 cm de diámetro recortado a lo largo) para recibir los escurrimientos. Después se colocó papel aluminio en todo lo largo del canal con una porción entrando en él y otra sobre el suelo. A la parte del papel que estaba en el suelo se le puso brea tanto por abajo como por encima; después se agregó arena gruesa. Dentro del canal se colocaron unas trampas de malla para detener el sedimento. En el extremo del canal hacia el cual estaba la pendiente, se pegó una manguera de tygón que se conectó con un depósito de 20 litros. El depósito se mantuvo enterrado; se le pegó un tubo de PVC para comunicarlo con el exterior y poder sacar el agua acumulada.

La escorrentía se midió únicamente durante un verano. En el invierno del siguiente año no fue posible medir los escurrimientos debido a la gran precipitación que dejó incomunicada la sierra por varias semanas. Además los escurrimetros no fueron diseñados para medir los escurrimientos bajo la nieve.

5.5 Evapotranspiración (ET).

Una vez determinados, con los métodos anteriores, algunos componentes del balance hídrico, es posible determinar indirectamente la evapotranspiración (ver sección 2.7). Es decir, si se conoce la precipitación (P), el drenaje en los mini-lisímetros (D_{lis}), la escorrentía (R), y, la diferencia de almacenamiento de agua en el suelo (en los tubos fuera de los lisímetros, ΔA_{suelo}), se puede calcular, por diferencia, la evapotranspiración (ET), al despejarla de la ecuación 1 (sección 1.3):

$$ET = P - R - D_{lis} - \Delta A_{suelo} \quad (4)$$

Esto amerita una observación: se está suponiendo que el drenaje en los lisímetros (D_{lis}) representa el drenaje en el suelo sin disturbio (D_{suelo}) y no es del todo cierto. Se debe

de tomar en cuenta las diferencias en humedad del suelo entre ambas situaciones (ver sección 7.4). Por lo tanto es necesario hacer una corrección al drenaje del lisímetro (D_{lis}) para obtener el drenaje real (D_{suelo}).

$$D_{suelo} = D_{lis} - (\Delta A_{suelo} - \Delta A_{lis}) \quad (5)$$

Ahora si, sustituyendo D_{suelo} en la ecuación 4 podemos calcular ET con mayor confianza:

$$ET = P - R - D_{suelo} - \Delta A_{suelo} \quad (6)$$

En los inviernos, la nieve y la gran cantidad de escurrimientos, entre otras cosas, dificultaron algunos monitoreos. Esto a su vez limitó el cálculo de la ET . Debido a lo anterior y considerando que en estas épocas hubo suficiente agua en el suelo como para satisfacer la demanda evaporativa atmosférica, en algunos casos se usó la evapotranspiración potencial (ETP) como la ET real (como en Arkley, 1981). La evapotranspiración potencial (ETP) para cada sitio se calculó con la fórmula de Thornthwaite. Para La Puerta se utilizaron datos de temperaturas de varios años de la estación meteorológica preexistente (fuente: SARH). Para Vallecitos y La Corona se utilizaron datos del período 1970-1974 del Observatorio Astronómico Nacional (Alvarez y Maisterrena, 1977).

5.6 Cálculos.

Se usó Análisis de Varianza de mediciones repetidas para comparar la humedad del suelo entre sitios. Este es el análisis estadístico que mejor se ajusta a este tipo de datos (Wilkinson, 1988; Montgomery, 1984).

Los datos se calcularon en la Hoja de Cálculo "Quattro Pro" versión 3.01 (Borland International, 1991).

Los análisis estadísticos se realizaron en los programas "Statgraphics" versión 5.0 (Statistical Graphics Corporation, 1991) y "Systat" versión 5.01 (Systat, Inc., 1990).

Las gráficas se elaboraron en el programa "SigmaPlot Scientific Graphing System" versión 5.0 (Jandel Corporation, 1992).

6 RESULTADOS

6.1 Comprobación de la similitud de condiciones entre los lisímetros y el estado natural.

El método utilizado para construir los lisímetros altera las condiciones naturales, debido a que el suelo es agregado a paladas al bote. Se trató de conservar la distribución original de las capas, por lo que la textura quedó distribuída dentro del lisímetro muy semejante al estado natural. Las alteraciones más evidentes, y quizás más importantes, recaen sobre la densidad y estructura del suelo. En suelos con gran desarrollo estructural, y sobre todo estructura grande (bloques, prismas, etc.) este método sería bastante criticable y, de hecho, bajo esas circunstancias no se recomienda. En el presente caso existe una justificación: los suelos de los sitios de estudio presentan un débil desarrollo de la estructura (ver descripción del área de estudio), y es principalmente granular.

A medida que se vertía suelo dentro del lisímetro, se apisonaba para tratar de igualar la densidad del suelo con la que existía afuera. Luego, con el mismo propósito, se dejó pasar un tiempo entre la instalación de los lisímetros (otoño de 1989) y el inicio de los monitoreos de la humedad del suelo (abril de 1990). En 1991 y 1993 se hicieron determinaciones de la densidad del suelo dentro y fuera de los lisímetros. En la Figura 9 se observa que la densidad, en general, es semejante dentro y fuera de los lisímetros. En Vallecitos, dentro de los lisímetros, no se pudo trabajar por capas debido a que el suelo estaba saturado en el momento de la determinación, por lo que sólo se presentan resultados de un único perfil de 0-80 cm. Fue notable que en la capa de 60-80 cm en La Corona había una densidad muy alta fuera de los lisímetros, mientras que adentro la densidad se mantiene

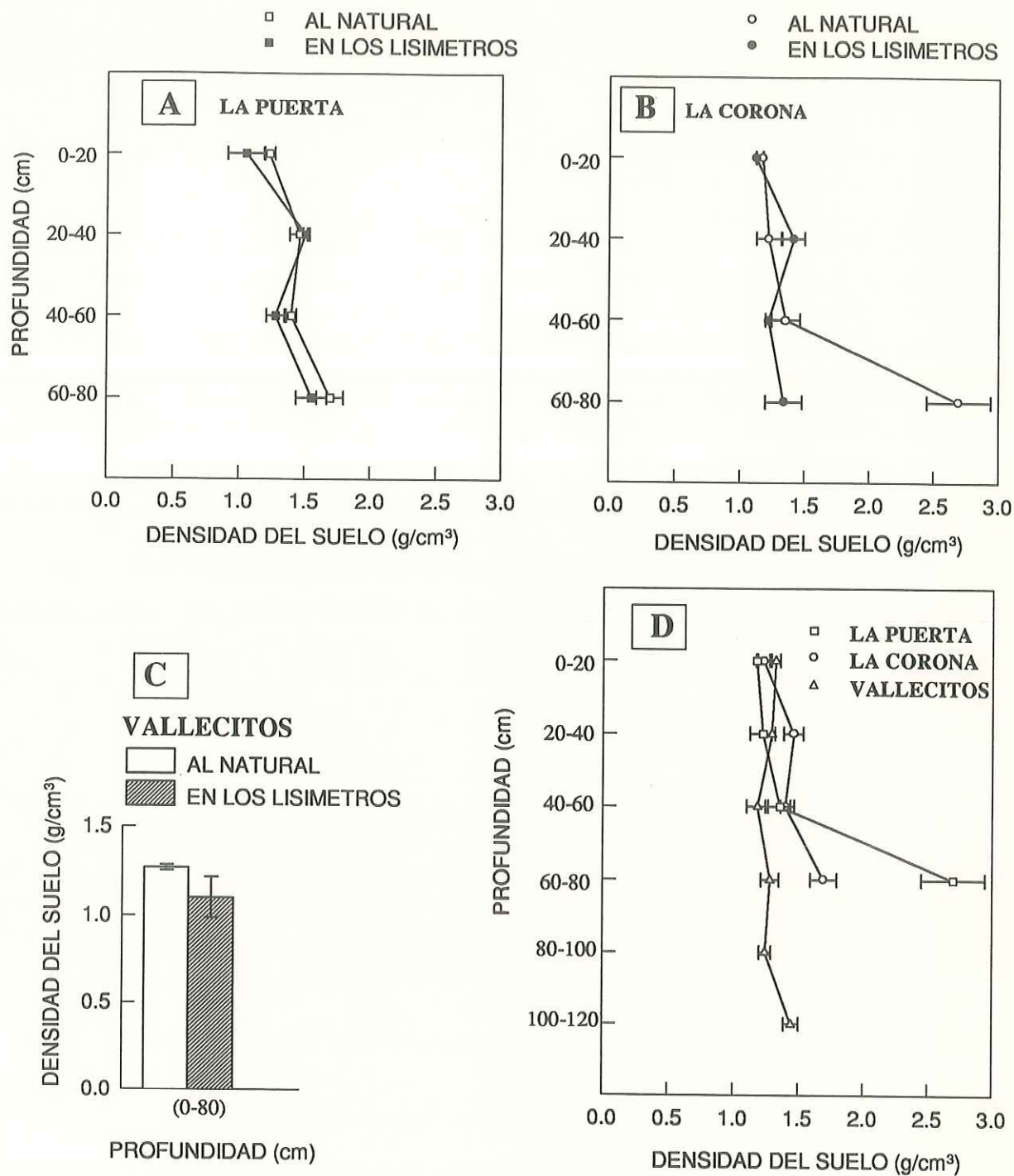


Fig. 9. A-C) Densidad del suelo dentro y fuera (al natural) de los lisímetros en cada sitio. D) las densidades fuera de los lisímetros en los tres sitios. Las barras representan ± 1 desviación estándar (N=2).

a un nivel muy cercano al de las capas superiores (Fi. 9b). Esta diferencia se debe a que en el suelo sin disturbio existe roca intemperizada desde ± 60 cm mientras que no la hay dentro de los lisímetros.

Comparando las densidades fuera de los lisímetros, de los tres sitios, se observa que Vallecitos mantiene una densidad más o menos similar en todas sus capas mientras que La Puerta y La Corona en la capa profunda aumentan su densidad debido a la roca intemperizada que está siendo alcanzada.

Las curvas de calibración de la sonda de neutrones también nos sirvieron para comparar las condiciones de los lisímetros con su entorno. En general podemos decir que hubo curvas similares dentro y fuera para cada sitio. En Vallecitos en todas las profundidades hubo una gran aproximación. En La Corona y La Puerta, de nuevo fue la capa más profunda la que se comportó en una forma un poco distinta y es debido a la roca intemperizada.

6.2 Precipitación.

En general se observa que la precipitación de invierno aumentó del ciclo 1990-1991 (495 mm en promedio de todas las estaciones, excepto Santa Cruz) al 1991-1992 (545 mm), en cambio en el verano se disminuyó de 1990 (154 mm) a 1991 (95 mm) y se aumentó de 1991 (95 mm) a 1992 (197 mm; Fig. 10). El primer año fue seco, el segundo fue intermedio y el tercero fue un año húmedo considerado año El Niño. Por otro lado se observa que la lluvia de invierno (562 ± 75 mm en promedio de los tres sitios de estudio y los dos inviernos) fue alrededor de tres veces mayor que la lluvia de verano (181 ± 77 mm en promedio de los tres sitios de estudio y los tres veranos).

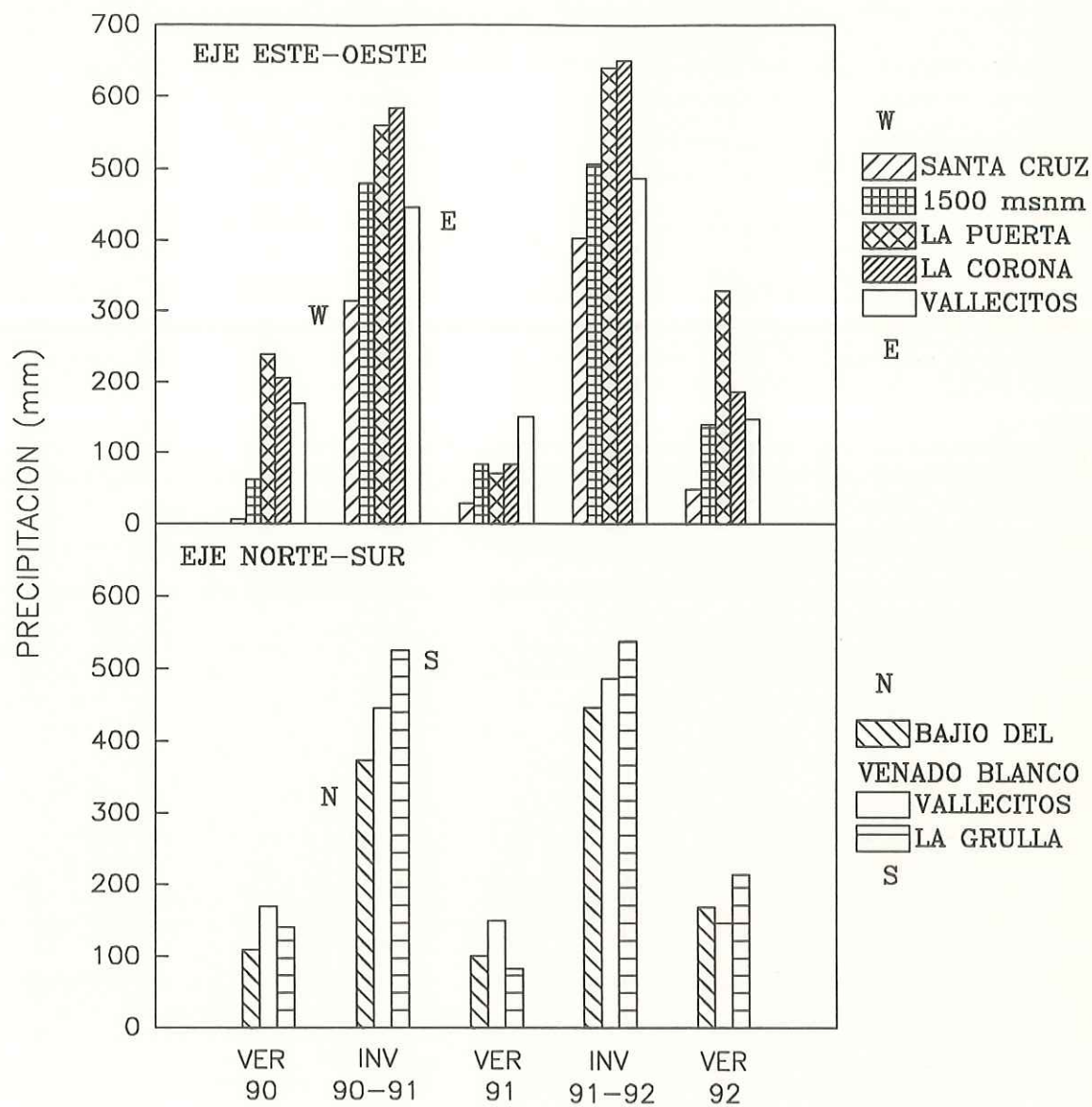


Figura 10. Precipitación en los ejes norte-sur y este-oeste de SSPM en las temporadas lluviosas de invierno (INV, octubre a mayo) y verano (VER, junio a septiembre) durante el tiempo del estudio.

Durante los inviernos monitoreados se distingue un patrón en la precipitación: la lluvia aumenta de oeste a este y de norte a sur (para ubicar los sitios ver Fig. 2). El aumento oeste-este puede deberse al efecto orográfico que la Sierra La Corona causa sobre la humedad que proviene del oeste y/o suroeste (Fig. 3). Es posible que se forme una sombra de lluvia al otro lado de esta sierra que explicaría la disminución de la lluvia en Vallecitos. El patrón de norte a sur quizás sea un resultado de este mismo efecto ya que la Sierra La Corona tiene su parte más alta frente a los pluviómetros del Bajío del Venado Blanco y Vallecitos, ubicados al norte, luego disminuye gradualmente hasta quedar a la misma altura de la altiplanicie disminuyendo así el posible efecto de sombra de lluvia en La Grulla. Además, es posible que en este último sitio haya un efecto orográfico respecto a las lluvias que vienen del suroeste.

Durante el verano no existe un patrón claramente visible en ninguno de estos dos ejes. Esto es atribuido a la gran variabilidad espacial que tienen las lluvias convectivas del verano. Lo único claramente regular es el hecho de que la lluvia disminuye considerablemente hacia el rancho Santa Cruz (como el monzón viene del sureste se forma una sombra de lluvia en la vertiente oeste).

La precipitación de verano fue muy variable en La Puerta y La Corona, mientras que en Vallecitos fue más o menos constante. La precipitación de invierno fue mayor en La Puerta y La Corona que en Vallecitos.

Durante el monitoreo de la lluvia hubo algunos eventos que ocasionaron pérdidas de datos. Por ejemplo en los inviernos en algunas ocasiones la lluvia sobrepasó la capacidad de algunos pluviómetros, sobre todo en La Corona y 1500 msnm. En el invierno de 1992-1993 la lluvia fue tan copiosa que sobrepasó la capacidad de todos los pluviómetros y además pasó mucho tiempo para que el camino permitiera el acceso a la Sierra y se siguió sumando precipitación. (Las estimaciones fueron hechas por medio de interpolación y

normalización, por el Dr. Richard Minnich de la Universidad de California en Riverside.) Se estima que la precipitación anual en el ciclo 1992-1993 fue 1806 mm en La Puerta, 1774 en La Corona y 1393 en Vallecitos.

6.3 Humedad del suelo.

6.3.1 La humedad del suelo dentro y fuera de los lisímetros.

Primero hay que anotar que la falta de registros tanto en La Corona (Fig. 11c) como en Vallecitos (Fig. 12a) en las dos épocas más húmedas fue debido a que en los inviernos la nieve permaneció durante más tiempo en esos sitios que en La Puerta, y por ello no se pudo medir la humedad del suelo. La Puerta es el único sitio en que fue posible monitorear en casi todos los viajes; ahí la nieve se derrite más rápido. En Vallecitos, en 1991 y 1992, una vez que se derritió la nieve se formó una laguna que también impidió medir la humedad del suelo en algunas fechas.

En las Figuras 11a y 11c se observa que la humedad del suelo dentro y fuera de los lisímetros tuvo un comportamiento diferente. En los primeros meses en La Puerta (Fig. 11a) la humedad dentro del lisímetro fue menor que la de afuera. Esto es debido a que cuando se instalaron los lisímetros el suelo estuvo expuesto a la desecación durante la labor, por lo que se secó a niveles más bajos que afuera; además, nos sugiere que las lluvias de invierno no fueron lo suficientemente copiosas para recargarlo. Este no es el caso de La Corona donde la humedad desde la primera medición ya era parecida dentro y fuera de los lisímetros.

De cualquier forma, una vez que el suelo del lisímetro alcanzó la humedad de afuera (a principios de julio para La Puerta, y desde abril para La Corona), se empezó a mantener más húmedo que afuera y se conservó a mayor humedad hasta que se terminó el estudio.

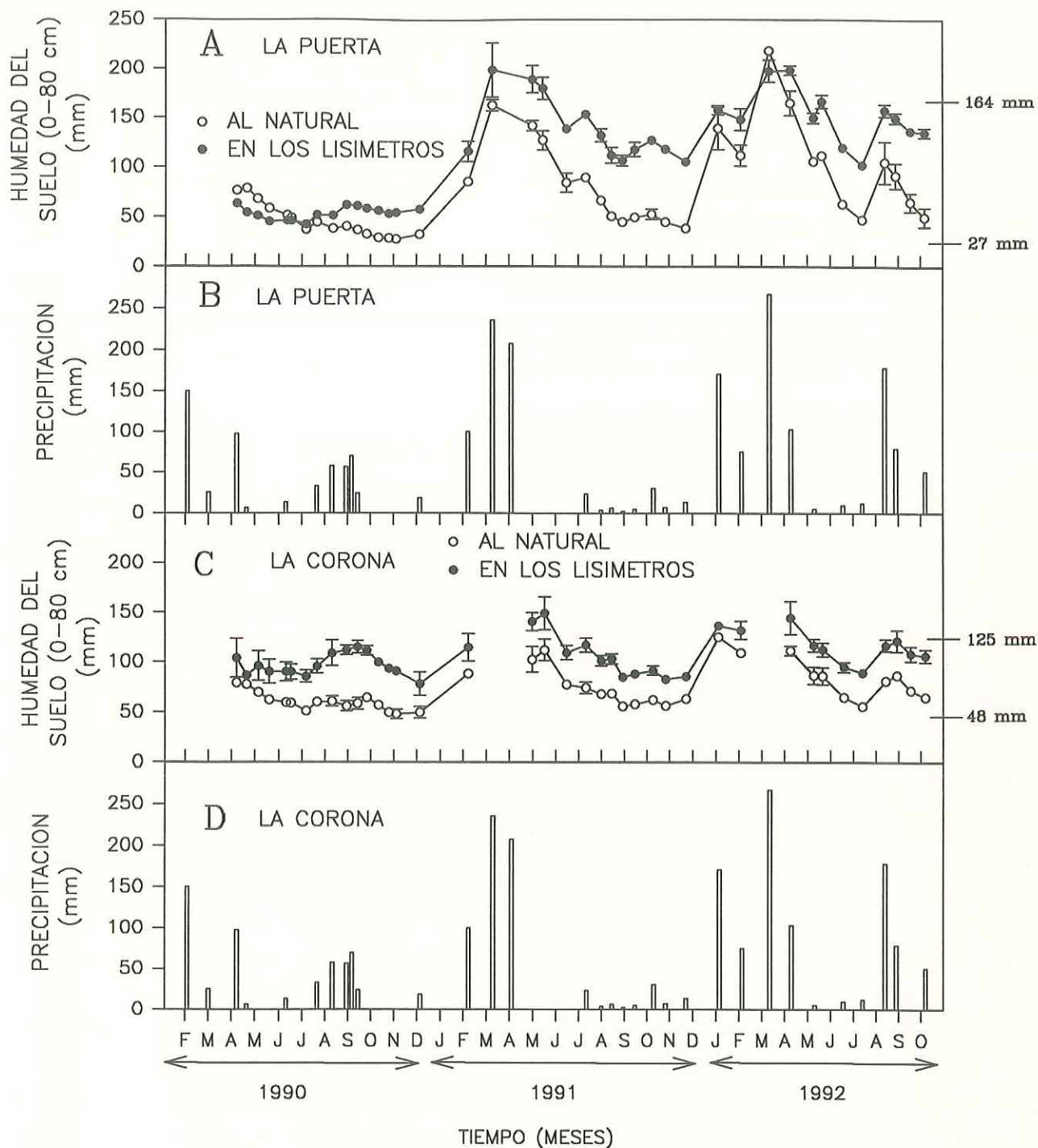


Fig. 11. Dinámica de la humedad del suelo en LA PUERTA (A) y en LA CORONA (C) dentro y fuera de los lisímetros. La barra representa ± 1 desviación estandar (N=2). Se muestra, además, la precipitación acumulada entre visitas para cada sitio (B y D). Los valores del lado derecho (en A y C) indican los límites inferior y superior de la capacidad de almacenamiento de agua extraíble.

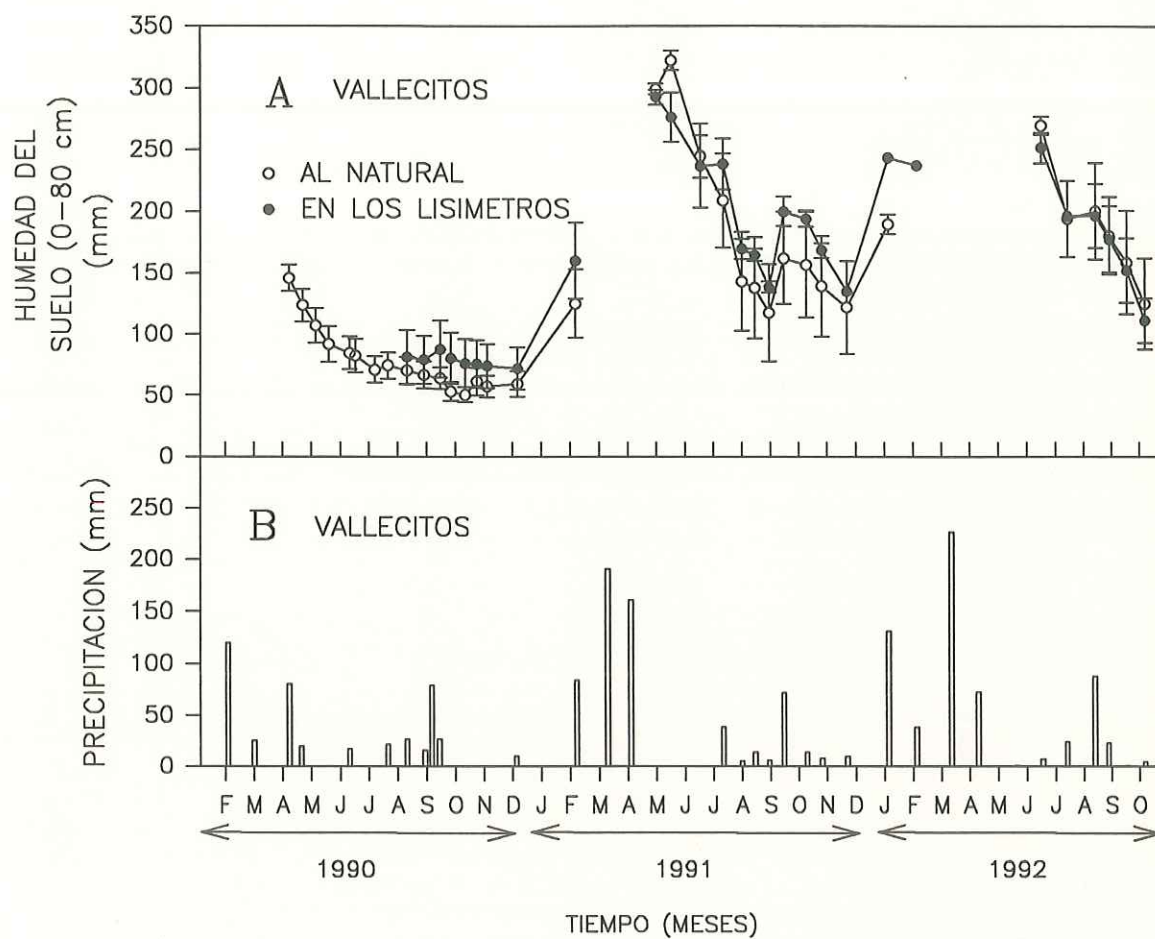


Fig. 12. A) Dinámica de la humedad del suelo en VALLECITOS dentro y fuera de los lisímetros. La barra representa ± 1 desviación estandar ($N=2$). En B se muestra la precipitación acumulada entre visitas. No hubo diferencias significativas entre la humedad del suelo dentro y fuera de los lisímetros (Análisis de Varianza de mediciones repetidas, $P>0.05$).

En los inviernos la humedad de afuera se hizo muy parecida a la de adentro; pero después se empezó a consumir el agua más rápidamente afuera que adentro, aumentando la diferencia en humedad debido a la transpiración de las plantas.

En Vallecitos pasó otra cosa: en la Figura 12a se observa que prácticamente no hubo diferencia en cuanto a humedad del suelo dentro y fuera de los lisímetros. Sin embargo, hay que aclarar que esto es en los primeros 80 cm. El suelo en el sitio alcanza más de 140 cm de profundidad, pero debido a que los lisímetros sólo tenían 80 cm, nos estamos limitando, en el caso de la Figura 12a, a la humedad en los primeros 80 cm. Más adelante se considerarán las capas más profundas.

6.3.2 La humedad del suelo en invierno y verano.

En las mismas gráficas (Figs. 11 y 12) se aprecia que la humedad fuera del lisímetro, es decir la del suelo sin disturbio, fue disminuyendo a partir del invierno de 1989-1990. Se observa que la disminución continuó hasta el otoño, siendo ésta la estación más seca del año. En el primer año se consumió el agua hasta un punto en el que ya casi no hubo cambio. Esto duró por lo menos un mes. Por ejemplo, en La Puerta se observan tres mediciones que no variaron de octubre a noviembre. En los siguientes años, si acaso llegó a consumirse el agua hasta el mismo nivel del primer año, fue sólo para volverse a recargar. De cualquier forma fue a finales del año cuando se llegó al menor contenido hídrico.

En Vallecitos sucedió algo un poco diferente. Una vez que llegaron las precipitaciones del invierno 1990-1991, la humedad del suelo no volvió a ser tan baja como en el primer año.

En los tres sitios se observa que, independientemente del año, la humedad del verano fue muy inferior a la del invierno (Fig. 11 y 12). Incluso en el primer año, que fue un año muy seco, se observa que la humedad registrada en primavera fue mayor que la del verano del mismo año. En los siguientes dos años se observa que a principios de la primavera el

suelo alcanzó la máxima recarga. En seguida, la humedad del suelo empezó a disminuir drásticamente (de primavera a verano) y durante el resto del año se mantuvo a humedades bajas. Durante verano y otoño ocurrieron pocas y pequeñas recargas que no se comparan a la de principios de año.

La precipitación de verano tuvo un efecto apreciable, en cuanto a la recarga de la humedad del suelo, sólo en el año de 1992, el más húmedo (esto se hizo más notable en La Puerta). En el año seco (1990) no contribuyó a la recarga de la humedad en todo el perfil. En el año intermedio se aprecia un efecto muy pequeño y a pesar de que la lluvia de verano de 1991 fue menor que la de 1990, la humedad del suelo se conserva un poco por arriba en 1991 y es debido a la recarga que se dio en el invierno de 1991.

La humedad más baja en todos los sitios se alcanzó a principios de invierno de 1990-1991.

6.3.3 Comparación de la humedad del suelo en los tres años.

Con el fin de comparar la humedad del suelo entre los tres años, y en vista de que para el primer año sólo se disponía de datos de abril a diciembre, únicamente se graficaron aquellas mediciones de los últimos dos años que correspondían a ese período (Fig. 13).

En las gráficas podemos apreciar como en los tres sitios es muy diferente el primer año de los otros dos, sobre todo en la primavera y a principios de verano. La humedad del suelo fue muy parecida en los años 1991 y 1992 en los tres sitios. En La Puerta (Fig. 13a) la humedad del suelo de estos dos años fue muy diferente a la del año seco desde abril hasta junio. Ya en julio, los contenidos hídricos fueron más parecidos, aunque hubo algunas diferencias causadas por las lluvias monzónicas, sobresaliendo la recarga en el año 1992. En La Corona (Fig. 13b) la diferencia se hizo apreciable sólo durante abril y mayo, haciéndose todas las curvas muy semejantes el resto del año. En Vallecitos (Fig. 13c) se

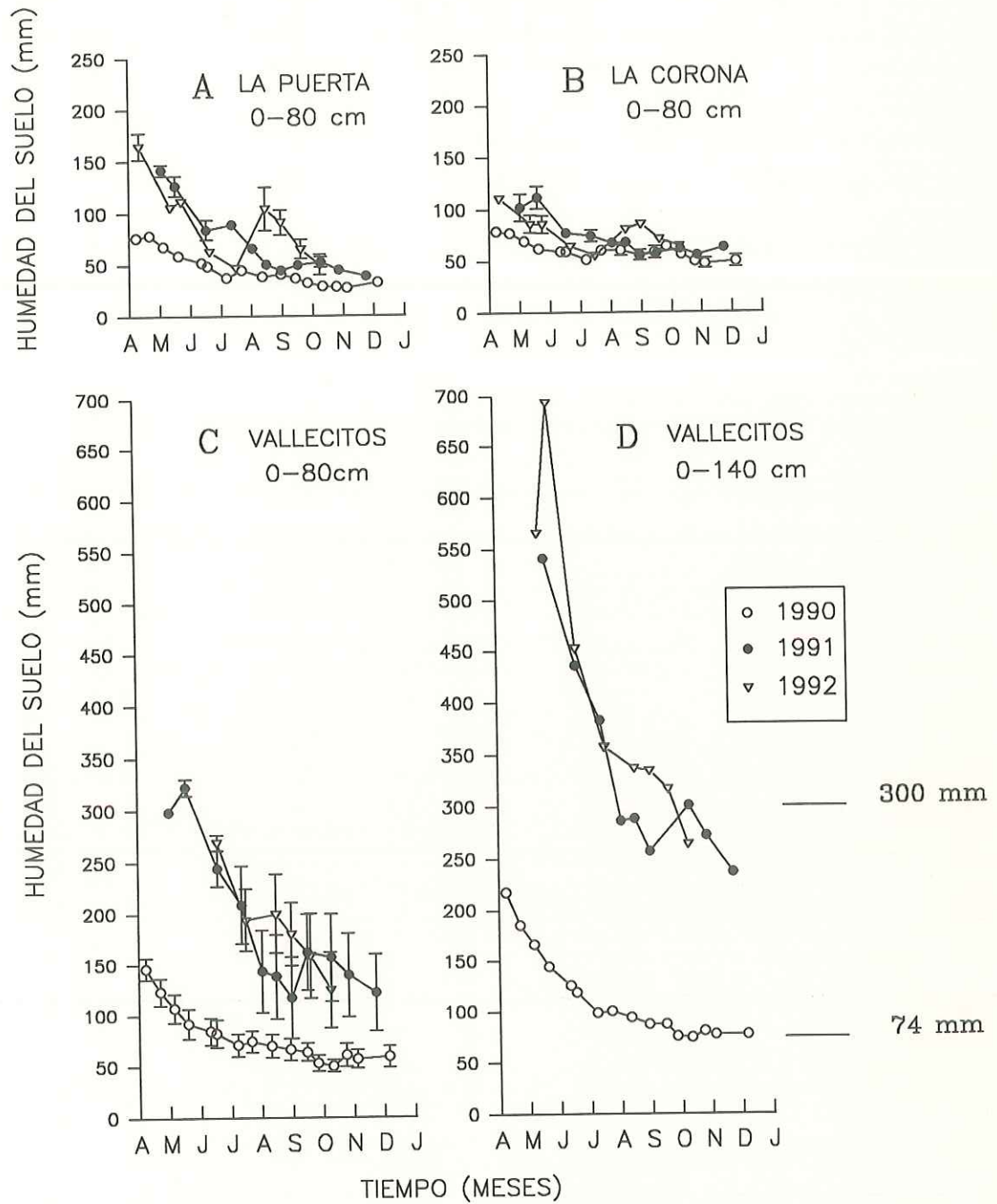


Fig. 13. Comparación de la dinámica de la humedad del suelo de abril a diciembre entre los tres años en los tres sitios de estudio. Los valores de la derecha indican los límites de la capacidad de agua extraíble.

aprecia una diferencia más grande en el primer año con respecto a los otros dos en los primeros 80 cm; si tomamos en cuenta todo el perfil la diferencia se hace más notable (Fig. 13d).

6.3.4 Comparación de la humedad del suelo entre los tres sitios.

Con el fin de comparar los tres sitios, en la Figura 14 sólo consideramos la profundidad 0-80 cm.

Vallecitos fue semejante a La Corona sólo en el primer verano, permaneciendo a mayor humedad en los demás años. Es decir, únicamente en la época más seca del estudio se llegó a una humedad tan baja como la de un sitio de bosque. Una vez que llegaron las lluvias del invierno 1990-1991 se mantuvo muy diferente, sin volver a disminuir tanto la humedad como el primer año.

En el año más seco, durante el verano, se aprecia una diferencia significativa en la humedad del suelo entre La Corona y La Puerta (Análisis de Varianza de mediciones repetidas de una vía, $P < 0.05$), siendo mayor la humedad en La Corona. Entre el resto de las mediciones no hay diferencias significativas. Sin embargo, hay otras diferencias que hay que señalar. Por ejemplo, el hecho de que en La Corona falten datos en invierno (en comparación con La Puerta) es debido a que la nieve siempre fue mayor y se mantuvo por más tiempo en este sitio, limitando con ello el monitoreo. Aunado a eso podemos apreciar en la Figura 14 que en cuanto se recarga el suelo por las lluvias de invierno la humedad fue menor en La Corona. Entonces, en el invierno también hay diferencias entre La Corona y La Puerta en cuanto a humedad del suelo.

6.3.5 Particularidades de Vallecitos.

En Vallecitos, como ya se ha mencionado, se formó una laguna después de que se derritió la nieve, que permaneció hasta mayo.

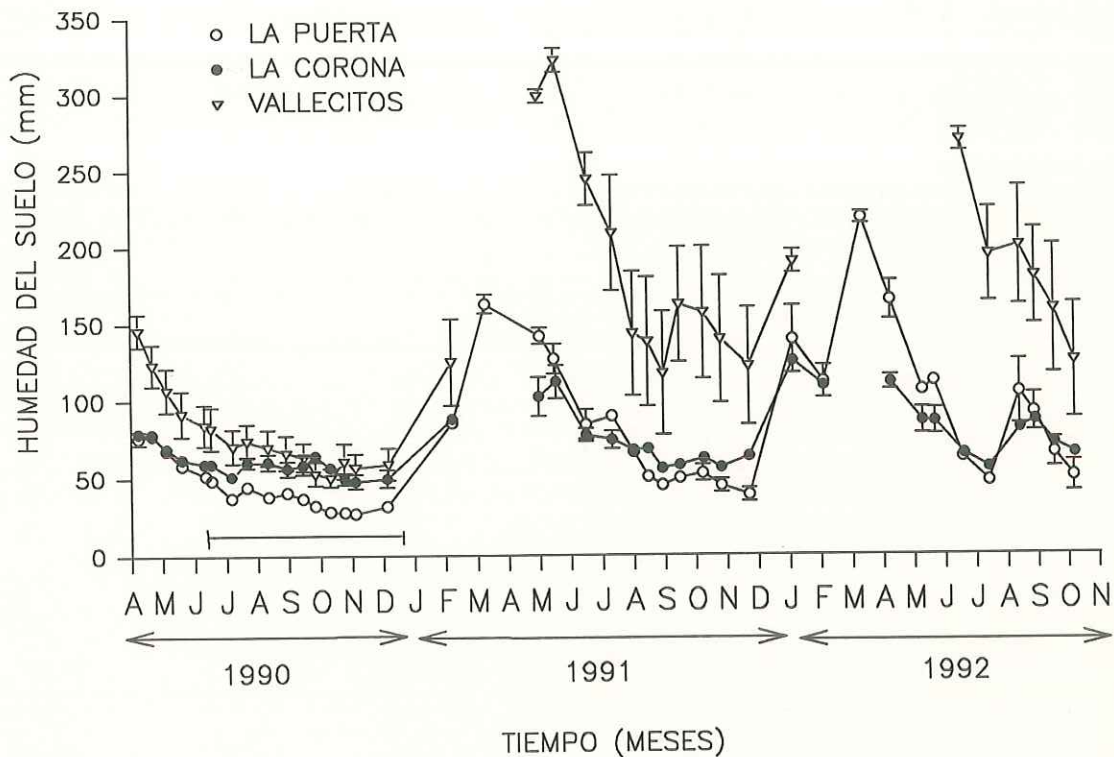


Fig. 14. Comparación de la dinámica de la humedad del suelo entre los tres sitios de estudio (0-80 cm). La barra representa ± 1 desviación estandar (N=2). Hubo diferencias significativas entre Vallecitos y los otro dos sitios (Análisis de Varianza de mediciones repetidas, $P < 0.05$). Entre La Puerta y La Corona sólo hubo diferencias significativas en el tramo indicado por la línea del fondo ($P < 0.05$), el resto es no significativo ($P > 0.05$).

Analizando los resultados en todo el perfil del suelo en Vallecitos se encontró algo interesante. En la Figura 15 se nota claramente una diferencia entre los primeros 80 cm y el resto del perfil. Las primeras capas tienen una dinámica similar a lo que habíamos observado anteriormente; es decir una recarga notable en invierno-primavera, seguida por una disminución notable en verano y permaneciendo bajas en humedad el resto del año. Por otra parte, en el primer año las capas profundas estaban tan secas como las superficiales, pero una vez que se presentó la gran recarga en el invierno de 1990-1991, la humedad permaneció elevada por el resto de las fechas monitoreadas. Se nota claramente la humedad mayor en los años 1991 y 1992 que en el año seco. El contenido de humedad fue tan alto como cuando el suelo estaba saturado en la superficie; es decir cuando existió la pequeña laguna, por lo que podría decirse que se formó un manto freático, el cual no se encontró en el año seco. Corroborando esto, durante la descripción del perfil del suelo en junio de 1992, el manto freático se encontró a los 60 cm (Graham, comunicación personal).

6.3.6 Capacidad de almacenamiento de agua extraíble.

Los límites superior e inferior de la capacidad de almacenamiento de agua extraíble se obtuvieron a partir de los datos de humedad del suelo como lo sugiere Ritchie (1981a). La menor humedad registrada durante todo el tiempo de estudio representa el límite inferior. El límite superior está dado por los valores más altos después que el drenaje ha ocurrido. Para el caso de la Puerta el límite inferior fue 27 mm y el superior 164 mm (Fig. 11a). El inferior se registró durante el primer año. Para el valor del límite superior se consideró al segundo registro más alto de 1992, ya que el valor más alto se presentó cuando el drenaje aún estaba ocurriendo (observación personal). Esto da una capacidad de 137 mm de agua. En La Corona los límites fueron 48 y 125 mm, resultando en 77 mm de capacidad de agua extraíble. El límite inferior se registró, al igual que La Puerta, en el primer año, en la época más seca del estudio. Para establecer el superior se usó el valor más alto.

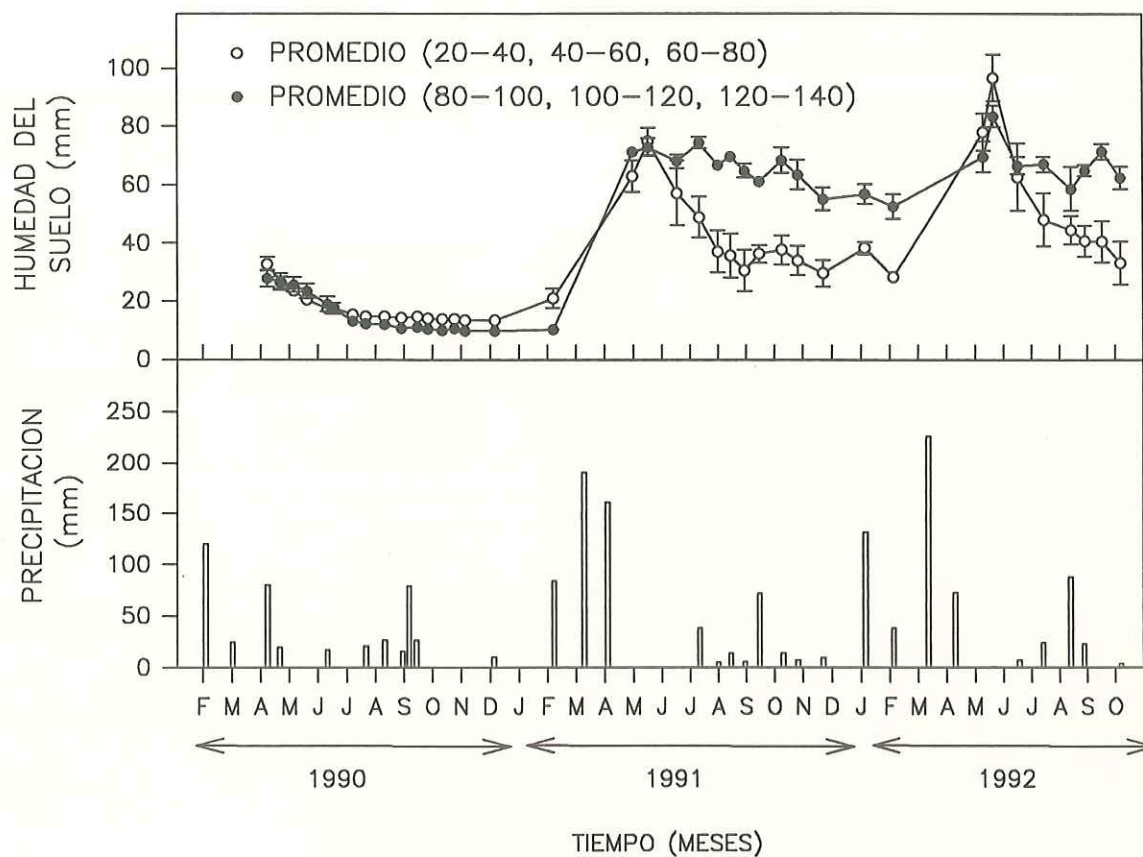


Fig. 15. Dinámica de la humedad del suelo en una capa promedio de 20 cm de espesor en la profundidad de 20 a 80 cm y en la profundidad de 80 a 140 cm en VALLECITOS. La barra representa ± 1 desviación estandar (N=3).

En La Puerta hay una capacidad de almacenamiento mayor que en La Corona, casi 1.8 veces más grande. Esto puede ser debido, entre otras cosas, a la profundidad de la capa de suelo. Los datos de densidad del suelo (Fig. 9d) nos sugieren que la roca intemperizada se encuentra a menor profundidad en La Corona.

En Vallecitos es obvio que existe una mayor capacidad de almacenamiento. Para obtener los límites es necesario considerar toda la profundidad del perfil del suelo. Considerando la profundidad mayor que se trabajó (140 cm), el límite inferior fue 74 mm (Fig. 13d). El límite superior es difícil de establecer ya que el agua se estanca y no tiene salida, ni siquiera como drenaje, ya que se forma el manto freático a poca profundidad. En este caso lo que hicimos fue considerar como agua disponible para las plantas la que se conserva en el verano. En la Fig. 13d se observa una pequeña estabilización alrededor de los 300 mm. Este valor fue el que usamos como límite superior. Esto resulta en 226 mm de agua extraíble. De cualquier forma, aún con estos problemas en establecer los límites para Vallecitos, es evidente que este sitio es el cuenta con mayor capacidad de almacenamiento, ya que el suelo tiene mayor profundidad y una textura más fina.

6.3.7 Información extra que proporciona el lisímetro.

El uso del lisímetro nos permitió observar situaciones que tal vez sólo con su uso es posible. En la Figura 16 sobresale lo siguiente. Adentro del lisímetro, en ambos sitios, las curvas de las capas intermedias (20-40 y 40-60) por lo regular no se juntan con la capa superior (0-20), sobre todo en los últimos dos años. En cambio afuera sólo hubo una separación notable durante la recarga de invierno en La Puerta. Al no haber raíces que consuman el agua dentro de los lisímetros, la humedad sólo es disminuída por la evaporación de la superficie del suelo y por el drenaje profundo. Pero una vez que la capa superior pierde bastante humedad a causa de la evaporación se evita que se sequen al mismo nivel que ésta

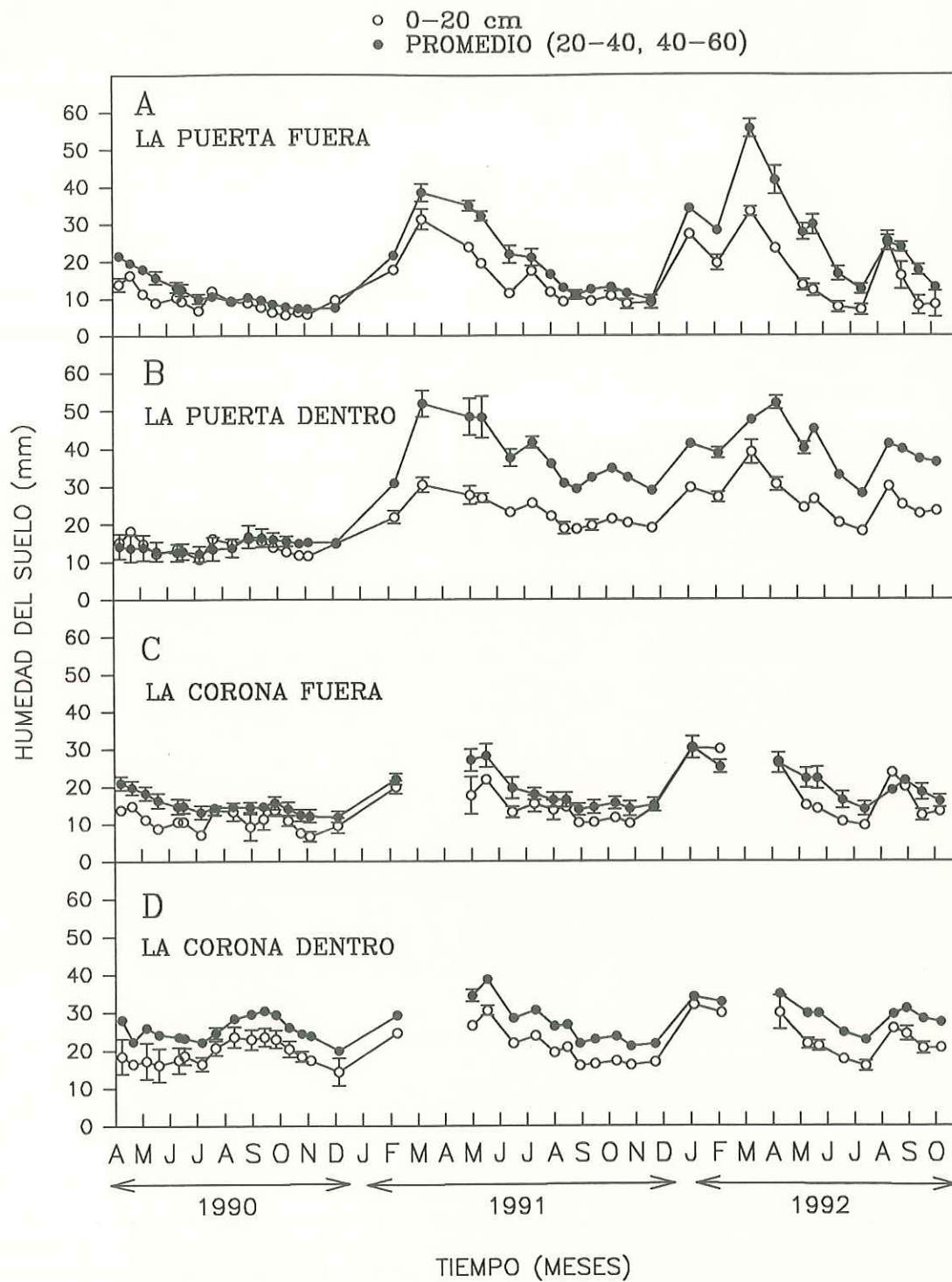


Fig. 16. Dinámica de la humedad del suelo en la capa 0-20 cm y en el promedio de las capas 20-40 y 40-60 cm para cada situación (dentro y fuera de los lisímetros) en LA PUERTA y LA CORONA. La barra representa ± 1 desviación estandar (N=2).

las siguientes dos capas, contrario a lo que sucede fuera de los lisímetros donde la vegetación seca esas capas también. Podemos entonces atribuir esta diferencia entre los perfiles a la transpiración en las capas intermedias fuera de los lisímetros.

En Vallecitos, al comparar la humedad del suelo dentro y fuera de los lisímetros en cada capa por separado se encontró lo siguiente (Fig. 17). La única capa, en la cual se separan las curvas por casi un año, es la de 20-40; esto probablemente se deba a la actividad radicular que existe afuera de los lisímetros. Además, y en apoyo a esta observación, durante la descripción del suelo se encontró que esa capa es la que tiene más raíces (Graham, comunicación personal). Por otro lado, en la capa de 0-20 se observa mayor humedad afuera de los lisímetros de febrero a junio en los años de 1991 y 1992. Los siguientes comentarios pueden explicar esto. En esos inviernos llegó agua por escurrimientos al valle y formó una laguna. Cuando es poca agua no logra sobrepasar la barrera del lisímetro y no entra en él, quedando más húmedo afuera que adentro (esto quizás ocurrió en enero y febrero). Pero a medida que hubo más escurrimientos (febrero y marzo) se formó una laguna que sobrepasó fácilmente la barrera del lisímetro y que, incluso, impidió el trabajo en el sitio (esto explica el espacio entre un monitoreo y otro en estas fechas). Cuando bajó el nivel del agua por abajo de la barrera del lisímetro, se desecó más rápido adentro que afuera (observación personal). Quizás debido a que adentro el agua drenaba hacia el depósito del lisímetro mientras que afuera había un manto freático que lo impedía. Además afuera había vegetación que pudo limitar la evaporación de la capa superficial, en cambio adentro el suelo estaba desnudo.

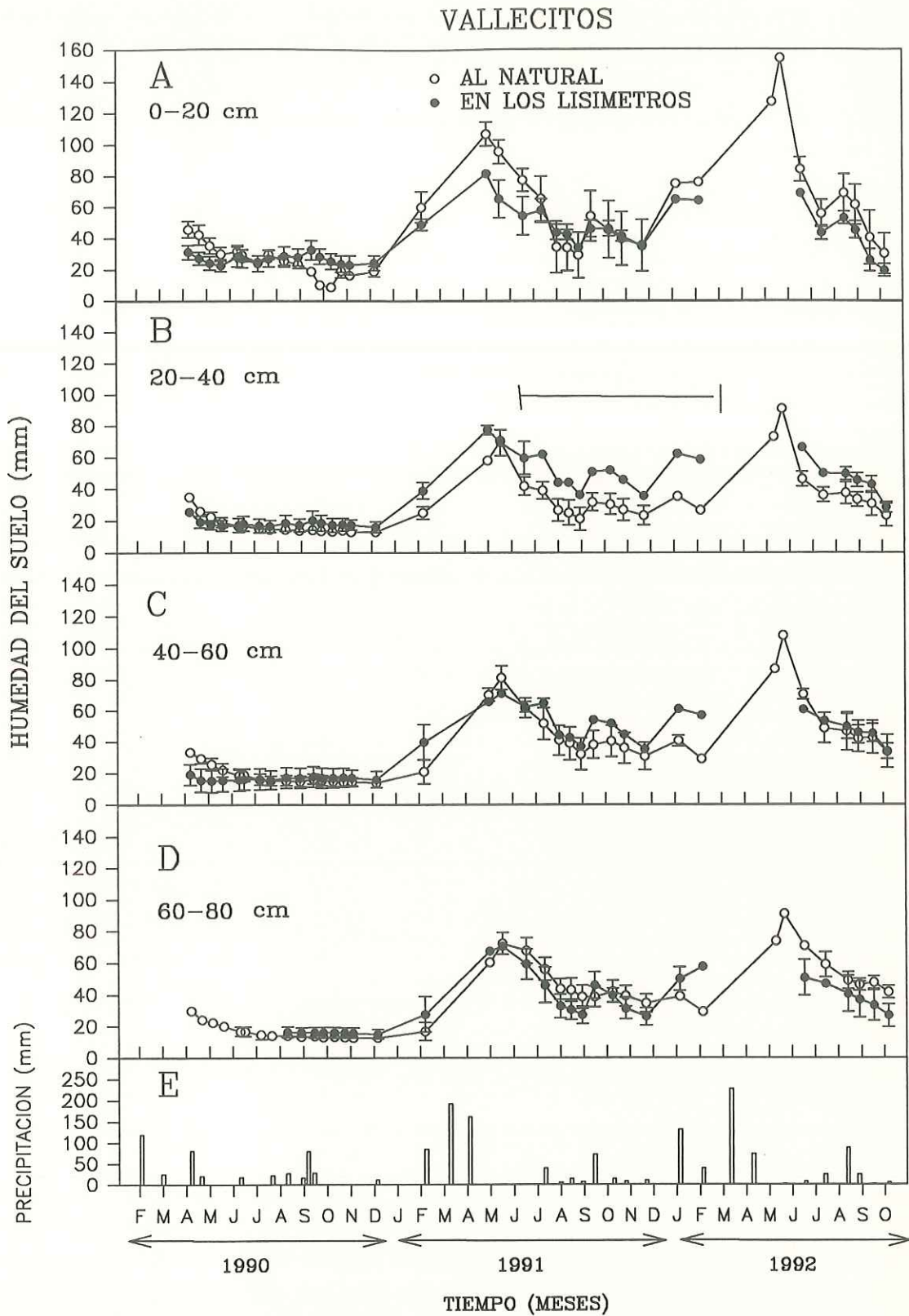


Fig. 17. Dinámica de la humedad del suelo por capas de 20 cm de espesor en Vallecitos dentro y fuera de los lisímetros. La barra representa ± 1 desviación estándar ($N=2$). Hubo diferencias significativas sólo en el tramo indicado por la línea (Análisis de Varianza de mediciones repetidas, $P<0.05$).

6.4 Balance hídrico.

Con el fin de comparar el balance hídrico entre sitios y entre los períodos de precipitación, invierno y verano, se consideró de junio a septiembre la influencia del monzón, es decir lluvias de verano, y de octubre a mayo las de invierno.

Los componentes del balance hídrico no se pudieron separar completamente en algunos casos. (Por ejemplo, en los veranos no se pudo separar la ET del escurrimiento, sólo se consiguió hacerlo en el último verano. Ese porcentaje de escorrentía se extrapoló hacia los otros veranos.) De cualquier forma con estos resultados es posible comparar el balance hídrico de los tres sitios.

6.4.1 Drenaje y escorrentía.

En los inviernos no se midieron los escurrimientos, sólo se hizo en un verano. Por otro lado, por el diseño del lisímetro no se permitió la salida de los escurrimientos y por lo tanto se sumaron al drenaje dentro del lisímetro. De ahí que en La Puerta no se reporten escurrimientos para el invierno (Tabla V). Sin embargo, el drenaje nos da información de la suma de ambos componentes. Además, como se ha señalado previamente, en muchos trabajos del balance hídrico se consideran juntos estos dos componentes. Esto es porque el drenaje profundo puede convertirse en flujo lateral al llegar a una capa impenetrable, como puede ser la roca subyacente, y salir como escurrimientos en las bases de las cuencas.

En La Corona el drenaje registrado fue tan bajo que se llegó a la conclusión de que no toda el agua precipitada estaba entrando al lisímetro (durante el trabajo de campo se revisaron todas las posibles fugas y ambos lisímetros siguieron registrando poco drenaje). En este sitio se conservó la nieve por más tiempo (de dos a tres meses, tanto fuera como dentro de los lisímetros), además la altura fue mayor en comparación con los otros dos sitios (Tabla VI). Para marzo, casi al final del período de acumulación de nieve, las capas más bajas de la nieve estaban congeladas y duras, y muy probablemente la capa superior

Tabla V. Balance hídrico estimado (mm) por periodos de precipitación en los sitios de estudio de la Sierra de San Pedro Mártir.

Período	Precipitación	ΔA^a	Drenaje ^b	Escorrentía	ET ^c	ETP ^d
La Puerta						
verano 14/06/90-25/09/90	252.9	-29.9	0.0	22.3 ^e	260.5	399.6
invierno 25/09/90-17/05/91	560.6	98.0	308.2		154.4	225.5
verano 17/05/91-10/10/91	70.2	-74.0	0.0	6.2 ^e	138.0	403.0
invierno 10/10/91-21/05/92	640.8	59.0	437.0		144.8	233.0
verano 21/05/92-07/10/92	328.8	-61.7	47.1	29.0 ^f	314.4	390.0
La Corona						
verano 14/06/90-25/09/90	226.2	-5.5	0.0	16.5 ^e	215.2	390.4
invierno 25/09/90-17/05/91	584.4	55.0	219.0	176.1 ^g	134.3	134.3
verano 17/05/91-10/10/91	83.3	-49.6	0.0	6.1 ^e	126.8	394.8
invierno 10/10/91-21/05/92	650.4	23.8	204.7	278.8 ^g	143.1	143.1
verano 21/05/92-07/10/92	185.8	-21.0	0.0	13.5 ^f	193.3	382.0
Vallecitos						
verano 14/06/90-25/09/90	186.6	-69.9	1.9		256.5 ⁱ	390.4
invierno 25/09/90-17/05/91	445.8	467.1	809.3	(697.8) ^h	134.3 ^d	134.3
verano 17/05/91-10/10/91	150.0	-240.1	236.6		390.1 ⁱ	394.8
invierno 10/10/91-17/06/92	486.8	151.5	710.6	(423.7) ^h	143.1 ^d	143.1
verano 17/06/92-07/10/92	146.6	-188.3	5.8		334.9 ⁱ	382.0

^aCambio en el contenido de agua del suelo; medido con la sonda de neutrones.

^bEstimado con el lisímetro según formula 5 pág. 43.

^cEvapotranspiración=Precipitación-Cambio en el contenido de agua del suelo-Drenaje-escorrentía.

^dEvapotranspiración potencial calculada según formula de Thornthwaite.

^eEscorrentía estimada de acuerdo a la relación escurrimiento-lluvia del verano de 1992.

^fEscorrentía medida en los escurrimetros.

^gCalculada según formula 7 pág. 61.

^hCalculada según formula 9 pág. 63.

ⁱEvapotranspiración=precipitación-cambio en el contenido de agua del suelo.

Tabla VI. Mediciones de la nieve en la Sierra de San Pedro Mártir.

Sitio	Fecha	Altura de la nieve (cm)	Contenido de agua (cm)	Densidad (%)	No. de observaciones
La Puerta	22 Dic 92	17.2±0.5	6.4 ^d		
La Corona	10 Mar 91	49.4±3.4 ^{ab}	34.9±3.0	70.8±6.6	8
	7 Ene 92	27.3±6.5	8.1±2.7	30.0±7.3	8
	12 Mar 92	91.8±12.2	65.2 ^{ef}	—	12
	22 Dic 92	38.5±1.6 ^{acf}	13.2±1.4	34.4±4.8	5
Vallecitos	10 Mar 91	35.3±8.4	13.1±3.1	37.2±0.0	8
	7 Ene 92	20.0±3.2	7.4±1.2	37.2±0.0	8
	12 Mar 92	31.8±4.9	11.7±1.8	37.3±0.1	8
	22 Dic 92	23.5±1.4	8.7±5.3	37.2±0.0	5
Observatorio	9 Mar 91	30.6±4.2	12.6±1.2	4.02±3.2	8
	3 Abr 91	70.1±11.1	27.3±7.2	38.8±7.6	12
	7 Ene 92	33.0±6.3	8.3±3.7	23.4±7.1	5
	12 Mar 92	91.4±15.8 ^{ab}	33.8 ^d	—	4

^aHielo en la parte baja de la nieve.

^bGran dificultad para llegar hasta el suelo.

^cNo se pudo llegar hasta el suelo.

^dEstimado usando densidad de 37%.

^eEstimado usando densidad de 71%.

^fProbablemente subestimado.

del suelo también (observación personal). Es probable que en estas fechas el agua de deshielo (derretimiento de la nieve) se escurra por encima de estas capas de hielo (duras e impenetrables) evitando así la entrada de agua a los lisímetros y al suelo en general. Pero, ¿cómo conocer la magnitud de este escurrimiento? Lo que se hizo fue usar los valores de la evapotranspiración potencial (ETP) como la ET real y como se conocen los demás componentes del balance hídrico se puede despejar el escurrimiento (R) en la ecuación 6 (sección 5.5), quedando:

$$R = P - D_{suelo} - ETP - \Delta A_{suelo} \quad (7)$$

Por otro lado, en La Puerta, donde parece que el suelo no se congela como en La Corona, la nieve se derrite rápidamente y no se acumula, lo que permite mayor drenaje y menor escurrimiento superficial. Otra evidencia que apoya esta hipótesis la podemos notar cuando se compara la humedad del suelo de La Corona y La Puerta: se observa que en los inviernos se recarga más el suelo en La Puerta (Fig. 13).

En Vallecitos se observa que el drenaje registrado en los inviernos fue mayor que la precipitación, y sumado a lo observado en las gráficas de humedad del suelo donde se aprecia una gran recarga después de las lluvias de invierno, nos sugiere una conclusión: hubo una entrada de agua muy importante aparte de la lluvia. De hecho es apreciable a simple vista la gran acumulación de agua que se da en este sitio: en las primaveras de 1991 y 1992 se formó una laguna en la pradera que sobrepasó la altura de la barrera de los lisímetros. Como ya se ha mencionado antes, este sitio tiene drenaje deficiente y los escurrimientos de los alrededores van a dar a Vallecitos. Entonces, el agua extra fue debida a los escurrimientos de los alrededores que se acumularon en este sitio.

No podemos hacer el cálculo de la evapotranspiración (ET) para Vallecitos en los inviernos directamente de los resultados, ya que se requiere del conocimiento de todos los componentes del balance hídrico, y no tenemos registrada la entrada por escurrimientos.

Sin embargo, debido a la gran humedad del suelo en invierno y primavera podemos suponer que el agua en el suelo no es limitante para la ET; por lo tanto, se considera que la demanda evaporativa del ambiente se satisface completamente. Esto quiere decir que la ET se hace igual a la evapotranspiración potencial (ETP) la cual sí podemos calcular. Con estos supuestos es posible hacer una estimación de la entrada por escurrimientos al lisímetro. Si el agua que entró al lisímetro proviene de dos fuentes (escurrimientos y precipitación, R y P) y parte de ella se perdió tanto en la evapotranspiración como en humedecer el suelo entonces lo que se drenó es:

$$D = P + R - ETP - \Delta A_{lis} \quad (8)$$

y despejando el escurrimiento (R)

$$R = D - P + ETP + \Delta A_{lis} \quad (9)$$

En estos cálculos no se considera el agua que no pudo pasar la barrera del lisímetro y así entrar en él; tampoco se toma en cuenta el movimiento lateral en el suelo que es muy probable que también esté aportando agua a la pradera. Por lo tanto la entrada de agua sería mayor que la calculada. De cualquier forma, los resultados así obtenidos nos indican que la entrada por escurrimientos fue mayor que la lluvia (Tabla V).

En los inviernos de 1991 y 1992 el drenaje profundo y la escorrentía fueron la salida principal del agua. El resto del agua precipitada se utilizó en la evapotranspiración y en humedecer al suelo. Al final del invierno, el agua que se empleó en recargar el suelo fue variable para los tres sitios (Tabla V). Mientras que en La Puerta se gastó 98 y 59 mm, en La Corona el gasto fue tan bajo como 55 y 24 mm; en cambio en Vallecitos se utilizó mucha más agua: 467 y 151 mm. Esto tiene que ver con la gran diferencia en capacidad de agua disponible entre los sitios y con su situación topográfica.

El drenaje en todos los sitios se dio principal y casi exclusivamente en los inviernos (Tabla V). En Vallecitos en el verano de 1991 hubo drenaje que tal vez fue una consecuencia

de la gran precipitación de invierno más que la de verano. Ya que por otro lado, en el verano de 1990, que tuvo mayor precipitación que en 1991, no hubo drenaje. El drenaje que se registró en La Puerta en el último verano fue debido a una gran precipitación que ocurrió sólo en ese sitio. Por otra parte, como demuestran las gráficas de humedad del suelo, por lo general en el verano no se logra recargar todo el perfil del suelo y la recarga sería necesaria para empezar a drenar. Esta sequía de verano puede deberse a que el agua infiltrada se utiliza rápida y completamente y/o a que el escurrimiento puede ser grande y no se infiltra mucha agua. Por lo tanto la cantidad disponible para ET dependerá de la magnitud del escurrimiento. Sin embargo, esta incógnita no la podemos despejar debido a la falta de mayor información sobre los escurrimientos en verano.

En Vallecitos en el verano la lluvia no se pierde por escurrimiento; es más, tal vez suceda lo contrario y se reciba agua de los alrededores.

Cuando sumamos la escorrentía y drenaje en una base anual, este valor es mayor que la ET en los dos sitios de bosque (Tabla VII). Esto se traduce en grandes volúmenes de agua que no utiliza el bosque, pero que se va a partes mal drenadas como Vallecitos y alimentan arroyos y mantos freáticos.

6.4.2 Evapotranspiración.

En todos los sitios por lo general la ET fue mayor en verano que en invierno (Tabla V). En el verano de 1991 hubo una ET muy baja en La Puerta y en La Corona que fue incluso menor que la ET del invierno.

Parece que en los sitios de bosque (La Puerta y La Corona) la ET tiene una relación más marcada con la lluvia de verano que con la de invierno. Por ejemplo, sabemos que el invierno de 1989-1990 fue muy seco (no se presenta en la tabla, pero se puede ver en las gráficas de humedad del suelo); pues bien, en el verano que le siguió hubo mayor ET que

Tabla VII. Balance hídrico anual (mm) de los sitios de estudio de la Sierra de San Pedro Mártir y de bosques cercanos. Para el caso de las salidas de agua se muestra el porcentaje que representa de la precipitación anual.

Sitio	Precipitación	Drenaje y escorrentía		Evapotranspiración	
La Puerta ^a	800±169	414±99	52%	376±83	47%
La Corona ^a	752±84	449±48	60%	299±38	40%
Vallecitos ^a	615±19			501±23	
Beaver Creek, AZ ^b	634	141	22%	493	78%
Lake Arrowhead, CA ^c	1114±438	448±427	40%	659±61	59%
Bass Lake, CA ^d	1260	680	54%	580	46%
Fraser, CO ^e	620	262	42%	358	58%

^aPromedio de los dos años 1990-1991 y 1991-1992.

^bLane y Barnes, 1986.

^cArkley, 1981.

^dRutter, 1968.

^eShachori y Michaeli, 1965.

en el verano de 1991 el cual fue precedido por un invierno más lluvioso. Esto se relaciona con la escasa lluvia que ocurrió en el verano de 1991. Por otra parte, cuando la precipitación de verano fue grande (como el verano de 1992 en La Puerta) la ET fue mayor.

En Vallecitos sucedió lo contrario. La ET fue mayor en los veranos de 1991 y 1992 que en el primer verano (1990) que fue el más lluvioso en ese sitio. La explicación es la siguiente. En este sitio se acumulan escurrimientos del invierno, no se pierden como sucede en los sitios de bosque, entonces entre mayor sea la lluvia en invierno mayor será el agua en el perfil del suelo. En cambio en los sitios de bosque es poca el agua que logran almacenar los suelos debido a que son poco profundos, por lo que al aumentar la precipitación lo que aumenta es la escorrentía y el drenaje.

En Vallecitos, si consideramos la profundidad de 0-80 cm, la ET es menor que si consideramos 0-140 cm. Se optó por considerar hasta 140 cm de profundidad ya que así se toma en cuenta el posible consumo de agua de partes más profundas. En este sitio la ET (0-140) en verano (datos más confiables) se hace muy parecida a la ETP. Esto sugiere que no hay déficit de agua del suelo y que la ET se da casi a su máxima capacidad. Sin embargo, hay que recordar que para el cálculo de la ETP se usaron temperaturas de otros años y de otro sitio. Además, la fórmula no considera otras características del ambiente como la humedad relativa. Por lo tanto es arriesgado concluir que la ET se da casi a su máxima capacidad.

Los resultados muestran, por otro lado, que Vallecitos presentó mayor ET que La Puerta y La Corona (Tabla VII). Entre los sitios de bosque casi no hay diferencias en cuanto a ET. Es en La Puerta donde se aprecia una ET ligeramente mayor. Sin embargo, parte de estas diferencias podrían atribuirse a la diferente cantidad de lluvia que se precipitó en ambos lugares. La otra parte de las diferencias puede ser debida a que en La Corona tanto la temperatura como la capacidad de almacenaje del suelo son menores y esto limita la ET.

Cuando comparamos la ET de La Puerta y La Corona con otros lugares sobresale la poca ET en SSPM (Tabla VII). Sin embargo, hay que anotar que ésta es una comparación muy burda puesto que se tienen que considerar alturas, pendientes, exposiciones, roca y vegetación similares. Cabe hacer algunas observaciones en la tabla. Por ejemplo, el lugar que tiene menor porcentaje en escurrimientos es el bosque de Arizona, E. U. y esto se explica por la estacionalidad de la lluvia: gran parte de ella (mayor porcentaje que SSPM) sucede en el verano justo cuando la vegetación requiere más. En Lake Arrowhead se estimó el balance hídrico considerando la roca intemperizada, la cual conduce a una mayor capacidad de almacenamiento de agua; por lo tanto, se retiene gran parte de la precipitación de invierno para ser utilizada en el verano, lo cual produce un menor porcentaje de escurrimientos comparado con SSPM. Por otro lado, Bass Lake tiene un balance parecido a SSPM sólo que por presentar mayor precipitación presenta, por lo tanto, mayor evapotranspiración. Faser, Colorado presenta una evapotranspiración parecida a SSPM pero tiene menor precipitación.

7 DISCUSION

7.1 Precipitación.

Tal como concluyen Reyes y Rojo (1985), la lluvia de verano presentó mayor variabilidad interanual que la del invierno y parece que la lluvia invernal es mayor con El Niño. Se ha mencionado que en el año 1992 ocurrió un evento El Niño y que los precedentes fueron secos (Reyes, comunicación personal).

Contrario a lo que se cree comúnmente (Roberts, 1989), la lluvia de verano en SSPM en los años de estudio nunca representó el 50 por ciento de la lluvia total. Sin embargo hay que tener presente que para una conclusión confiable es necesario contar con datos de precipitación de más ciclos anuales.

7.2 Humedad del suelo.

El hecho de que en el primer otoño la humedad del suelo llegara al punto más bajo de todos los años del estudio (en los tres sitios) y de que se conservara más o menos constante en ese nivel, tal vez nos indique el límite inferior de agua disponible para cada sitio. Como señaló Ritchie (1981a): "los cambios en el contenido de agua deben prácticamente cesar en todas las profundidades cuando el límite bajo de agua disponible está siendo alcanzado". Este límite, así como el superior, que también se puede obtener de las curvas de la dinámica de agua del suelo, nos permiten conocer la capacidad de disponibilidad de agua de los sitios.

Como se ha mencionado, los suelos son poco profundos en los sitios de bosque y esto causa poco almacenaje de la lluvia de invierno. Durante la descripción de los suelos en estos sitios se encontró que la roca dura estaba a poca profundidad. No había una gran capa

de roca intemperizada como se ha encontrado en las montañas del Sur de California (Arkley, 1981; Jones y Graham, 1993). Esto hace una gran diferencia en cuanto a capacidad de agua extraíble entre SSPM (77 a 137 mm) y las montañas de San Bernardino (128 a 496 mm).

Vallecitos tuvo mayor humedad del suelo por varias razones. Destaca el hecho de que recibe agua de los alrededores por escurrimiento, a tal grado que en los años húmedos esta fuente de agua fue mayor que la lluvia de invierno. La capacidad de almacenamiento del sitio es mayor que la de los otros sitios, ya que tiene una textura más fina y tiene mayor profundidad el perfil del suelo.

Las lluvias de invierno aportaron mayor humedad al suelo que las de verano. Es más, cierta cantidad (pequeña en el caso de los bosques) de humedad del suelo permaneció hasta el verano cuando fue consumida por evapotranspiración. Las lluvias de verano por lo general no lograron recargar el suelo, sólo lo hicieron en 1992 y sobre todo en La Puerta. Por lo tanto, se puede considerar, tal como lo hace Miller *et al.* (1983) para el caso de Echo Valley, que en los sitios de bosque de la Sierra de San Pedro Mártir existe una sequía de verano característica del clima mediterráneo. (En el sitio de pradera se cumplió lo anterior sólo en el primer año). Cabe hacer notar, sin embargo, que en el año húmedo de 1992, en los tres sitios, prácticamente no hubo sequía en el suelo durante todo el año.

La gran diferencia en humedad del suelo en las dos épocas lluviosas puede deberse no sólo a la diferencia en precipitación, sino a factores como los que considera Cable (1980; ver Antecedentes). Es decir quizás a causa de una menor infiltración y mayor evapotranspiración en el verano. Resumiendo, la menor humedad en el verano podría deberse a lo siguiente: 1) Una menor precipitación en el verano que en el invierno; 2) La intensidad de las lluvias de verano, típicamente, exceden la capacidad de infiltración de los suelos; y 3) la evapotranspiración es mayor en el verano ocasionando que el agua infiltrada se consuma rápida y completamente.

Basándonos en una clasificación que hace Rutter (1968) en cuanto a disponibilidad de agua del suelo, podemos clasificar a los sitios de bosque de la Sierra de San Pedro Mártir en dos categorías. a) "déficit severo de agua del suelo"; esto es porque se consume toda el agua disponible por lo menos durante todo un mes (en el primer año). b) "déficit moderado de agua del suelo"; porque la máxima disminución excede la mitad del agua disponible, incluso puede alcanzar el punto de marchitez permanente justo antes de ser restaurada la humedad (en el último año). El año de 1991 quedaría como una transición entre estas dos categorías.

Como se mencionó anteriormente, en el primer año se alcanzó la menor humedad del suelo, siendo más baja en La Puerta que en La Corona. Quizás las plantas de La Puerta absorban agua a potenciales más bajos que las de La Corona, secando, por lo tanto, al suelo más fuertemente en años secos.

El que *Abies concolor* se encuentre en La Corona y no en La Puerta apoya la hipótesis anterior, ya que se ha encontrado que esta especie es más resistente al frío y menos resistente a las temperaturas altas y a la sequía que *Pinus jeffreyi* (Smith, 1985).

7.3 Balance hídrico.

Es bueno comentar que las estimaciones de la ET se basaron sólo en la profundidad del perfil del suelo. Quizás el incluir los cambios de humedad en la roca intemperizada y grietas, aumente la ET estimada de una forma significativa. Como lo mencionaron Arkley (1981) y Jones y Graham (1993) ahí puede estar una fuente muy importante de agua para las plantas. Entonces, en este trabajo, parte del agua que se registró como drenaje pudo haber sido consumido por las plantas.

Algo que resulta interesante en los resultados es el hecho de que en Vallecitos la ET resultó mayor que en los otros sitios. Esto puede deberse a varias razones:

- Vallecitos recibe agua por escurrimientos mientras que los otros sitios la pierden por la misma vía. Es un sitio mal drenado donde se acumula el agua mientras que los otros son bien drenados.
- Vallecitos tiene mayor capacidad de almacenaje de agua que los otros sitios ya que la textura del suelo es más fina y es mayor la profundidad del perfil.
- Quizás las plantas de los otros sitios exploten agua de la roca intemperizada y de las grietas de la roca que no hemos considerado, lo que haría una mayor ET que la estimada.
- Vallecitos es un sitio expuesto a mayor insolación. Además, es en los claros como el de este sitio donde el viento puede desarrollar mayores velocidades.
- Las plantas en Vallecitos podrían consumir agua del manto freático, ya que éste se encontraba a muy poca profundidad (de 60 a 80 cm)

A pesar de que no tenemos información sobre la profundidad total de las raíces, no descartamos esta última posibilidad, ya que últimamente se ha evidenciado la importancia que tiene el consumo de agua profunda en varias plantas (Richards y Caldwell, 1987).

Por otro lado, también es interesante el hecho de que La Puerta y La Corona hayan tenido una evapotranspiración parecida. Esperábamos encontrar mayor ET en La Corona por presentar mayor densidad de árboles. Por otro lado, también se encontró una menor disponibilidad de agua en La Corona. Entonces, ¿cómo explicar la mayor densidad de árboles en este sitio? Se puede explicar mejor si consideramos las diferencias en déficit hídrico en ambos sitios. Es decir, aunque un sitio tenga más agua disponible y una ET mayor, si se tiene una gran demanda evaporativa de la atmósfera, puede haber mayor déficit hídrico que un sitio con menor ET y agua disponible (Stephenson, 1990). Es probable que en La Puerta haya un déficit hídrico mayor que en La Corona. Los resultados en humedad del suelo así lo confirman. El límite inferior de agua extraíble fue menor en La Puerta que

en La Corona lo cual podría implicar que las plantas en ese sitio estuvieron más estresadas debido a un mayor déficit hídrico. Por otra parte, sabemos que en La Corona las temperaturas son más bajas debido a que estas disminuyen con la altitud. En general la situación podría ser parecida con lo que sucede en las montañas del Oeste de los Estados Unidos donde el déficit hídrico disminuye con la altitud (Stephenson, 1990).

La ET de los sitios de bosque de SSPM es baja en relación con otros bosques del Sur de California. Esto puede ser debido, por un lado, a la mayor precipitación en el Sur de California. También puede ser debido al poco almacenaje de la lluvia de invierno en SSPM. En San Bernardino Mountains se encontró que la roca intemperizada almacena suficiente agua de invierno que es utilizada en verano y así se explica en gran medida la gran productividad de estas montañas a pesar de la sequía de verano (Arkley, 1981). En cambio, en SSPM parece que las lluvias de verano son la principal fuente de agua para la ET de verano. Al haber poco almacenaje de la precipitación de invierno la mayoría del agua se va por escurrimiento o por drenaje (que al fin de cuentas puede convertirse en flujo lateral y resultar en escurrimiento). Por lo tanto, entre mayor precipitación haya en invierno mayores van a ser los escurrimientos. Quizás la respuesta de las cuencas sea rápida con lo que se explicaría en parte la gran cantidad de escurrimientos a principios de 1993.

La densidad de árboles es más baja en SSPM en comparación con las montañas del Sur de California (Barbour *et al.*, 1991). Esto ha sido atribuido a la alta frecuencia de incendios naturales en la región. Sin embargo, quizás esto sea resultado de la poca disponibilidad de agua. En San Bernardino Mountains se encontró que donde el suelo era delgado la densidad del bosque era baja; esto fue atribuido a que las raíces se distribuyen más superficialmente y cada árbol requiere, por lo tanto, de mayor extensión horizontal por lo que se mantienen más separados (Arkley, 1981). Esto podría ser la causa principal

de la situación de SSPM, pero también podría funcionar en forma adicional a la hipótesis de los incendios (ver sección 1.3). De cualquier forma, es necesario confrontar estas dos hipótesis, no excluyentes, con más investigación.

7.4 Metodología.

Se ha establecido que el drenaje es dependiente, en cierta medida, del estado de humedad precedente (Lane y Barnes, 1986) y que la evaporación es limitada por la humedad disponible, disminuyendo rápidamente a medida que el suelo se seca (Rose, 1968; Satterlund y Adams, 1992). Entonces, el hecho de que el suelo siempre se conservara más húmedo dentro del lisímetro no nos permite aplicar las cifras del drenaje y la evaporación del lisímetro al suelo libre (en los casos de La Puerta y La Corona).

Por lo tanto, para calcular el drenaje fuera de los lisímetros en La Puerta y La Corona, se consideró la diferencia de humedad del suelo entre las dos situaciones (dentro y fuera) en cada evento de precipitación registrado. Es decir, se trabajó bajo el siguiente supuesto: si dentro del lisímetro en ciertos eventos lluviosos y a un contenido de humedad dado se drenó cierta cantidad de agua, entonces para afuera, con los mismos eventos lluviosos, se necesitaría primero igualar la humedad que se tiene adentro para drenar la misma cantidad. Entonces se restó la diferencia de humedad para cada evento lluvioso al drenaje producido en el lisímetro.

Por el diseño de los lisímetros, el agua que entra al sistema sólo tiene tres caminos a seguir: almacenarse en el suelo, drenarse hacia abajo del mini-lisímetro o evaporarse. Entonces, si se conoce la precipitación (P), el drenaje en los mini-lisímetros (D_{lis}), y la diferencia de almacenamiento de agua en el suelo dentro de los mini-lisímetros (ΔA_{lis}), se puede calcular, por diferencia, la evaporación del suelo en el lisímetro (E_{lis}), al eliminar R y T de la ecuación 1, y al despejar E_{lis} :

$$E_{lis} = P - D_{lis} - \Delta A_{lis} \quad (10)$$

En este trabajo se pretendía calcular la transpiración (T) a partir de la evaporación y drenaje dentro del lisímetro y de la diferencia de agua almacenada en el suelo fuera de los mini-lisímetros (ΔA_{suelo}). Las raíces de las plantas se distribuyen libremente en esta zona y participan, por lo tanto, en la pérdida de humedad del suelo. La relación es:

$$T = P - R - E_{lis} - D_{suelo} - \Delta A_{suelo} \quad (11)$$

De esta manera se pretendía separar los dos componentes de la evapotranspiración: la evaporación del suelo y la transpiración de las plantas. Pero esto sería posible sólo si suponemos que el drenaje y la evaporación en los lisímetros es similar al que ocurre fuera de ellos ($D_{lis} = D_{suelo}$, $E_{lis} = E_{suelo}$), lo cual no es del todo cierto. Cuando el lisímetro recién se ha instalado, la humedad en él es muy parecida a la de afuera, y es quizás en este momento cuando los niveles de evaporación sean muy parecidos, pero a medida que la humedad se va quedando almacenada más dentro del lisímetro que fuera de él, debido a la ausencia de la transpiración, la evaporación se hace mayor adentro que afuera al haber mayor humedad.

Como hemos visto en el capítulo pasado, con la medición de la humedad dentro de los lisímetros se puede ilustrar el proceso de como la evaporación de la capa superior del suelo llega a un punto tal que protege de la evaporación a las capas más profundas. Además, nos pueden ayudar a identificar las capas en donde se encuentra la actividad principal de las raíces.

Para obtener mejores resultados con este tipo de lisímetro es necesario hacer pequeñas modificaciones. Un arreglo importante es eliminar la barrera que se dejó sobre la superficie del suelo para que no se vea impedida la escurriente.

También, en la utilización de esta metodología, hay que restringirse a ciertos tipos de sitios. Estos lisímetros no funcionan cuando o donde se inunda y se forma un manto freático. Para años secos tal vez funcionen, pero sobre todo tomando núcleos de suelo con todo y vegetación.

8 CONCLUSIONES

- 1) La lluvia fue muy parecida en La Puerta (800 ± 169 mm) y La Corona (752 ± 84) y un poco diferente en Vallecitos (615 ± 19). De las dos temporadas lluviosas la invernal fue la más afectada por el evento El Niño. El año más lluvioso fue precisamente 1992 (969 mm en La Puerta), el año en que se registró el fenómeno EL Niño; sin embargo, el siguiente año (1993, el cual no se trabajó en cuanto al balance hídrico) se estima que se precipitaron 1806 mm en La Puerta. Por otro lado, La cantidad de lluvia invernal estuvo relacionada con la orografía (efecto de montaña y sombra de lluvia). En cambio la estival fue muy variable entre los años y sitios de estudio. Durante los años de estudio la invernal (562 ± 75 mm) fue tres veces mayor que la estival (181 ± 77).
- 2) El suelo alcanzó la máxima sequía a finales de otoño y principios de invierno en todos los sitios. Se puede considerar que en algunos años hubo una sequía de verano característica del clima mediterráneo. Los sitios de bosque presentaron durante los años de estudio déficit de agua del suelo severo (en 1990) y moderado (en 1991).
- 3) Las lluvias de invierno aportaron mayor humedad al suelo que las de verano. En los inviernos se recargó todo el perfil del suelo. En el verano sólo en una ocasión en La Puerta. Esto puede deberse a que en el verano a) llueve menos, b) hay una mayor evapotranspiración pudiendo ocasionar que el agua infiltrada se consuma rápida y completamente, y c) el escurrimiento, que no se midió satisfactoriamente, puede ser grande.
- 4) La humedad del suelo proveniente de las lluvias de invierno, se agotó más rápido en el año seco (1990) que en los otros dos años. En los años húmedos (1991 y 1992) la humedad permaneció hasta junio. En el año seco el suelo estuvo con poca humedad desde abril.

- 5) Vallecitos presentó grandes diferencias en el año seco (1990) con respecto a los años más húmedos (1991 y 1992). En estos últimos, quizás recibió más agua por escurrimientos (>697 y >423 mm) que por precipitación (595 y 693 mm) formándose una laguna que permaneció hasta mayo. Las capas profundas permanecieron saturadas por el resto del año. En cambio en el año seco todo el perfil del suelo se secó desde el verano.
- 6) Vallecitos tuvo mayor humedad en el suelo que los demás sitios. También presentó mayor evapotranspiración (501 ± 23 mm). Esto pudo ser debido a varios factores: a) recibe agua por escurrimiento y movimiento lateral mientras que los otros sitios la pierden por la misma vía, además es un sitio mal drenado; b) tiene mayor capacidad de almacenaje de agua debido a una textura más fina y a una mayor profundidad del suelo; c) está expuesto a una mayor insolación y velocidad del viento; d) las plantas podrían consumir agua del manto freático que se formó en los años húmedos; y e) quizás las plantas de los sitios de bosque exploten agua de la roca intemperizada y de las grietas de la roca que no se consideraron en este estudio.
- 7) En los sitios de bosque en los años húmedos (1991 y 1992) la salida principal del agua precipitada fue por drenaje y escurrimiento (52% en La Puerta y 60% en La Corona). Estas salidas se dieron casi exclusivamente en el invierno (del 60 al 70% de la lluvia invernal).
- 8) La capacidad de almacenamiento de agua extraíble es pequeña en los sitios de bosque (La Corona = 77 mm, La Puerta = 137 mm) y quizás sea debido a eso que se conservó poca agua de invierno para el consumo de verano. Esto también puede ser la causa de los grandes volúmenes de drenaje y escurrimientos que se produjeron en los años húmedos.

- 9) Las lluvias de verano fueron una entrada de agua importante para la evapotranspiración de verano en los sitios de bosque.
- 10) En La Corona se originó menor drenaje y mayor escorrentía que La Puerta. Esto puede ser porque en La Corona se conservó la nieve por más tiempo y debajo de ésta había un suelo congelado que no permitió una buena infiltración, sino escurrimiento, al derretirse la nieve.
- 11) La evapotranspiración fue casi igual o un poco mayor en La Puerta (376 ± 83 mm) que en La Corona (299 ± 23 mm), pero el déficit hídrico probablemente fue mayor en La Puerta. Esto pudiera explicar la diferencias en vegetación que hay entre los dos sitios. Además, en el año más seco, durante el verano, La Puerta presentó una humedad del suelo significativamente menor que en La Corona. Esto puede corroborar el hecho de que haya mayor estrés hídrico en La Puerta.
- 12) La evapotranspiración de los sitios de bosque fue menor que en sitios similares de California, quizás debido a una menor precipitación en SSPM, pero también, al bajo almacenaje del agua precipitada durante el invierno. También puede ser debido a que en algunos estudios en California se considera la roca intemperizada y en este estudio no.
- 13) La baja densidad de árboles de San Pedro Mártir en comparación con los bosques del Sur de California podría ser explicada por lo siguiente: a) por la baja capacidad de almacenamiento de agua disponible desde el invierno, originándose una dependencia de las lluvias de verano las cuales son menos confiables, y b) por la acción de incendios naturales frecuentes.

- 14) El lisímetro permitió la estimación de salidas del agua en el balance hídrico del suelo.
Considerando las diferencias en humedad del suelo entre el suelo del lisímetro y el suelo fuera de él, es posible aproximarnos al drenaje y escurrimiento que pudiera ocurrir en el sitio. El escurrimiento se sumó al drenaje debido a la barrera del lisímetro.
- 15) Los lisímetros nos permitieron describir otras situaciones. Por ejemplo, el proceso de como la evaporación de la capa superficial del suelo protege de la evaporación a las capas más profundas. También nos dieron información de las capas donde se lleva a cabo la actividad principal de las raíces.

9 RECOMENDACIONES

- 1) Primero que todo se recomienda la continuación del registro de datos meteorológicos en la Sierra de San Pedro Mártir, ya que como hemos visto esto es de suma importancia para conocer el balance hídrico y así conocer el aporte de agua aprovechable para el Estado. De ser posible, son recomendables la instalación de más estaciones y la medición de otros factores, particularmente humedad relativa, radiación neta, temperatura y evaporación.
- 2) Para responder algunas dudas que quedaron en el aire en este estudio es necesario obtener más información sobre los escurrimientos en verano.
- 3) Se recomienda la investigación sobre las características de la roca en esta montaña. Es decir, hacer un reconocimiento sobre la profundidad de la roca intemperizada, frecuencia y tamaños de las grietas, etc. Enseguida sería recomendable llevar a cabo un estudio para evaluar la importancia de la roca intemperizada y las grietas de las rocas como lugares de almacenamiento de agua. Después se podría evaluar su importancia en el balance hídrico en general.
- 4) Por otro lado sería interesante hacer experimentos para conocer cual es la causa de la baja densidad de árboles en la Sierra de San Pedro Mártir en comparación con los bosques de las montañas del Sur de California. Es decir, atacar el siguiente problema: ¿Son los incendios los responsables de la baja densidad de árboles en los bosques de la Sierra de San Pedro Mártir? ¿o son otros factores como la baja disponibilidad de agua y un mayor déficit hídrico?
- 5) Como en el presente trabajo se diseñó una metodología, salieron a relucir una serie de consideraciones que afectan el buen desarrollo de la investigación. A continuación doy algunas recomendaciones:

- 5.1) El método se recomienda para sitios que no sean de acumulación de agua, ni de mucha pendiente.
- 5.2) Si se quiere conocer el drenaje por separado, es importante eliminar la barrera del lisímetro para evitar que el agua de escurrimiento ingrese al suelo y se sume al drenaje. Esto, siempre y cuando se mida aparte el escurrimiento y se puedan analizar todos los componentes del balance hídrico.
- 5.3) En caso de que el suelo cuente con gran desarrollo de la estructura es mejor usar lisímetros que alteren menos la condición natural. Por ejemplo aquellos en que se toman núcleos de suelo.
- 5.4) Se recomienda el uso de mangueras de mayor diámetro (de media pulgada por lo menos) en los lisímetros, para evitar problemas en la extracción del agua.

10 LITERATURA CITADA

- ALVAREZ, M. 1983. Climatología de la Sierra de San Pedro Mártir. Contribución No. 123 Memoria del XV Simposio Anual del Desert Fishes Journal. 12 p.
- ALVAREZ, M. y MAISTERRENA, J. 1977. Climatological and meteorological characteristics of the Observatorio Astronómico Nacional at San Pedro Mártir, B. C. Rev. Mex. Astron. Astrof. 2:43-52.
- ARKLEY, R. J. 1981. Soil moisture use by mixed conifer forest in a summer-dry climate. Soil Sci. Soc. Am. J. 45:423-427.
- BARBOUR, M. G., W. J. BARRY, J. BENDIMEZ, J. H. BURK, J. W. FOSTER, E. FRANCO-VIZCAINO, M. P. HAMILTON, J. W. MENKE y J. SOSA-RAMIREZ. 1991. Progress report: comparison and management of montane ecosystems in the Peninsular Range of the Californias for the period september, 1989 - may, 1991. Comunicaciones Académicas. CICESE, 47 p.
- BARBOUR, M. G., J. H. BURK y W. D. PITTS. 1987. Terrestrial Plant Ecology. 2nd. ed. Benjamin/Cummings, Menlo Park. 634 p.
- BIDWELL, R. G. S. 1979. Fisiología Vegetal. A.G.T. Editor. México. 784 p.
- BLASQUEZ, L. 1959. Hidrogeología de las Regiones Desérticas de México. Anales del Instituto de Geología, U.N.A.M. Tomo XV
- BOAST, C. W. 1986. Evaporation from bare soil measured with high spatial resolution. En: ASA-SSSA, Methods of Soil Analysis. Agronomy 9:889-900.
- CABLE, D. R. 1980. Seasonal patterns of soil water recharge and extraction on the semidesert ranges. J. Range Manage. 33:9-15.

- CARBON, B. A., ROBERTS, F. J., FARRINGTON, P. y J. D. BERESFORD. 1982. Deep drainage and water use of forests and pastures grown on deep sands in a mediterranean environment. *J. Hydrol.* 55:53-64.
- CARRIJO, O. A. y R. H. CUENCA. 1993. Precision of evapotranspiration estimates using neutron probe. *J. Irrig. and Drain. Engrg.* 118:943-953.
- CERVANTES-SERVÍN, L., MAASS, M. y R. DOMINGUEZ. 1988. Relación lluvia-escurrimiento en un sistema pequeño de cuencas de selva baja caducifolia. *Ingeniería Hidráulica en México. Segunda época*, 3:30-42.
- CUENCA, R. H. 1988. Model for evapotranspiration using neutron probe data. *J. Irrig. and Drain. Engrg.* 114: 644-663.
- DAWSON, T. E. 1993. Woodland water balance. *Trends Ecol. Evol.* 8:120-121.
- DELGADILLO, J. 1992. *Florística y Ecología del Norte de Baja California*. Editorial UABC. 339 p.
- DELGADO, L. A. 1991. El plutón de San Pedro Mártir: una visita geológica. p. 25-27. *Memorias de la III Semana de la Exploración y la Historia, Sierra de San Pedro Mártir*. UABC, Ensenada.
- ESPINOZA, P. 1983. Estudio de resistividad en los valles de San Pedro Mártir y Valle Chico B. C. Tesis de Maestría. CICESE, Ensenada. 112 p.
- FRANCO-VIZCAINO, E. (En prensa). Water regime in soils and plants along an aridity gradient in central Baja California, México. *J. Arid Env.*
- GARCIA, E. y P. MOSIÑO. 1968. *Los Climas de Baja California*. Instituto de Geografía de la U.N.A.M., México. 27 p.
- GARCIA, J. y REYES, S. (En prensa). Baja California, invierno de 1993: zona de desastre. Informe Técnico. *Comunicaciones Académicas, Serie Oceanografía Física*, CICESE. 20 p.

- GARDNER, W. H. 1986. Water content. En: ASA-SSSA, Methods of Soil Analysis. Agronomy 9:493-544
- GASTIL, R. G. 1990. Zoned plutons of the Peninsular Ranges in Southern and Baja California. Nature and Culture 2:77-90.
- GASTIL, R. G., R. P. PHILLIPS y E.C. ALLISON. 1975. Reconnaissance Geology of the State of Baja California. The Geological Society of America. Memoir 140.
- GAVANDE, S.A. 1972. Física de Suelos: Principios y Aplicaciones. Limusa. México. 351 p.
- GRAHAM, R. Comunicación personal. Department of Soil and Environmental Sciences, University of California, Riverside.
- HARROLD, L. L. 1969. Evapotranspiration: a factor in the plant-soil-water economy. p. 694-716 En: Proceedings of The First International Seminar for Hydrology Professors (The Progress of Hydrology), July 13-25, 1969. Urbana. UNESCO.
- HAVERKAMP, R., VACLIN, M. y G. VACHAUD. 1984. Error analysis in estimating the soil water content from neutron probe measurements: 1. local standpoint. Soil Sci. 137:78-90.
- JOFFRE, R. y S. RAMBAL. 1993. How tree cover influences the water balance of mediterranean rangelands. Ecology 74:570-582.
- JONES, D. P. y R. C. GRAHAM. 1993. Water-holding characteristics of weathered granitic rock in chaparral and forest ecosystems. Soil Sci. Soc. Am. J. 57:256-261.
- KANE, D. L. y J. STEIN. 1983. Water movement into seasonally frozen soils. Water Resour. Res. 19:1547-1557.
- KRAMER, P. J. 1969. Relaciones Hídricas de Suelos y Plantas: Una Síntesis Moderna. Centro Regional de Ayuda Técnica. México. 538 p.

- LANE, L. J. y J. F. BARNES. 1986. Water balance calculations in southwestern woodlands. p. 480-488. En: R. L. Everett (comp.) Proceedings of the Pinyon-Juniper Conference; 1986, January 13-16, Reno, NV. General Technical Report INT-215. Ogden, VT: USDA, Forest Service, Intermountain Research Station. 581 p.
- MARKHAM, C. G. 1972. Baja California's climate. *Weatherwise*. 25(2):64-76.
- MILLER, P. C., D. K. POOLE y P. M. MILLER. 1983. The influence of annual precipitation, topography, and the vegetative cover on soil moisture and summer drought in Southern California. *Oecología*. 56:385-391.
- MINNICH, R. A. 1987. The distribution of forest trees in Northern Baja California, Mexico. *Madroño* 34:98-127.
- MINNICH, R. A. 1983. Fire mosaics in southern California and northern Baja California. *Science* 219:1287-1294.
- MINNICH, R. A. y E. FRANCO-VIZCAINO. (Sin publicar). The Vegetation of Baja California Since European Contact.
- MINNICH, R. A., E. FRANCO-VIZCAINO, J. SOSA-RAMIREZ y C. YUE-HONG. 1993. Lightning detection rates and wildland fire in the mountains of Northern Baja California, Mexico. *Atmósfera* 6:235-253.
- MIRANDA, F. 1987. Caracterización de zonas climáticas sinópticas en la península de B.C. Tesis de Licenciatura. ESCM/UABC, Ensenada. 89 p.
- MONTES, C. Comunicación personal. Departamento de Ecología, Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada.
- MONTGOMERY, D. C. 1984. Design and Analysis of Experiments. 2nd ed. John Wiley and Sons, 538 p.
- NG, E. y MILLER, P. C. 1980. Soil moisture relations in the southern California chaparral. *Ecology* 61:98-107.

- NOY-MEIR, I. 1973. Desert ecosystems: environment and producers. *Annu. Rev. Ecol. Syst.* 4:25-51.
- PAREDES, A. E. 1985. Water: the most important natural resource for the state of Baja California, Mexico. p. 305-313. En: E.E. Whitehead, C.F. Hutchinson, B.N. Timmermann y R.G. Varady (eds). *Arid Lands Today and Tomorrow. Proc. of an International Research and Development Conference. Tucson Arizona Oct. 20-25, 1985.* Westview Press, Boulder.
- PASSINI, F. M., DELGADILLO, J. y M. SALAZAR. 1989. L'écosystème forestier de Basse-Californie: composition floristique, variables écologiques principales dynamique. *Oecologia Plantarum* 10:275-293.
- PAYNE, B. R. y J. DINCER, 1969. Nuclear techniques in hydrology. p. 126-148 En: *Proceedings of The First International Seminar for Hydrology Professors (The Progress of Hydrology)*, July 13-25, 1969, Urbana. UNESCO.
- POOLE, D. K., ROBERTS, S. W. y P. C. MILLER. 1981. Water utilization. p. 123-149. En: P. C. Miller (ed). *Resource Use by Chaparral and Matorral: A Comparison of Vegetation Function in two Mediterranean Type Ecosystems.* Springer-Verlag, New York.
- REYES, S. Comunicación personal. Departamento de Oceanografía Física, Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada.
- REYES, S. y P. ROJO. 1985. Variabilidad de la precipitación en la península de Baja California. *Rev. Geofis.* 22/23:111-128.
- RICHARDS, J. H. y M. M. CALDWELL. 1987. Hydraulic lift: substantial nocturnal water transport between soil layers by *Artemisia tridentata* roots. *Oecologia* 73:486-489.
- RITCHIE, J. T. 1981a. Soil water availability. En: J. Monteith y C. Webb (eds). *Soil Water and Nitrogen in Mediterranean-Type Environments.* *Plant and Soil.* 58:81-96.

- RITCHIE, J. T. 1981b. Water dynamics in the soil-plant-atmosphere system. En: J. Monteith y C. Webb (eds). Soil Water and Nitrogen in Mediterranean-Type Environments. Plant and Soil. 58:327-338.
- ROBERTS, N. C. 1989. Baja California Plant Field Guide. Natural History Publishing Company, La Jolla. 309 p.
- ROJO, P. 1985. Variabilidad climática en la península de Baja California. Tesis de Licenciatura. ESCM/UABC, Ensenada. 63 p.
- ROSE, D. A. 1968. Water movement in porous materials III. Evaporation of water from soil. Brit. J. Appl. Phys. 1:1779-1791.
- ROSENBERG, N. J. 1974. Micro-climate: the Biological Environment. Wiley, New York.
- RUIZ-CAMPOS, G. 1991. Caracterización limnológica de los arroyos de la Sierra San Pedro Mártir como habitats de la trucha endémica *Oncorhynchus mykiss nelsoni* (Evermann). p. 39-41. Memorias de la III Semana de la Exploración y la Historia, Sierra de San Pedro Mártir. UABC, Ensenada.
- RUTTER, A. J. 1975. The hydrological cycle in vegetation. p. 111-154. En: J. L. Monteith (ed). Vegetation and the Atmosphere. Vol. 1, Academic Press, New York.
- RUTTER, A. J. 1968. Water consumption by forests. p. 23-84. En T. T. Kolzlowsky (ed). Water Deficits and Plant Growth. Vol. 2, Academic Press, New York.
- SATTERLUND, D. R. y W. A. ADAMS. 1992. Wildland Watershed Management. Second Edition. John Wiley and Sons, Inc, New York. 436 p.
- SHACHORI, A. Y. y A. MICHAELI. 1965. Water yields of forest, maquis and grass covers in semi-arid regions: a literature review. En: F. E. Eckardt (ed). Methodology of plant eco-physiology proceedings of the montpellier symposium. UNESCO.

- SMITH, W. K. 1985. Western montane forest. p. 95-126. En: B. F. Chabot y H. A. Mooney (eds). *Physiological Ecology of North American Plant Communities*. Chapman and Hall, New York.
- SOSA-RAMIREZ, J. y E. FRANCO-VIZCAINO. 1991. Comparación de los efectos de manejo en dos ecosistemas de montaña en la Cordillera Peninsular de las Californias. Evaluación sobre la factibilidad de una reserva de la biosfera transfronteriza. Reporte técnico CIECT9101. Comunicaciones Académicas, CICESE.
- SPECHT, R. L. 1988. *Mediterranean-Type Ecosystems. A Data Source Book*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht. 248 p.
- STEPHENSON, N. L. 1990. Climatic control of vegetation distribution: the role of the water balance. *Am. Nat.* 135:649-170.
- WELLS II, W. G. 1982. Hydrology of mediterranean-type ecosystems: a summary and synthesis. p. 426-430. En: C. E. Conrand y W. C. Oechel (comp). *Proceedings of the Symposium on Dynamics and Management of Mediterranean-Type Ecosystems*, June 22-26, San Diego, Ca. Gen Tech. Rep. PSW-58. Berkeley, Ca. Pacific Southwest Forest and Range Experiment Station, Forest Service, USDA, 637 p.
- WILKINSON, L. 1988. *SYSTAT: The System for Statistics*. SYSTAT, Inc, Evanston. 822 p.
- YRURENTAGOYENA, C. 1992. Some geohydrological features of the Santo Domingo Basin, Sierra San Pedro Mártir, Baja California Norte, México. p. 119-134. En: C. D. Becker y D. A. Neitzel (eds). *Water Quality in North American Rivers Systems*. Batelle Press, Columbus.
- ZUÑIGA, W. R. En proceso. Obtención de una metodología de ordenamiento ambiental para un plan de manejo de la Cuenca Santo Domingo, Baja California. Tesis de maestría. Facultad de Ciencias/UABC.

