

Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada



**GEOMORFOLOGIA E HIDROLOGIA SUPERFICIAL
ENTRE PUERTECITOS Y SAN LUIS GONZAGA,
BAJA CALIFORNIA, APOYADOS EN SENSORES
REMOTOS Y MODELOS DIGITALES DE ELEVACION**

**TESIS
MAESTRIA EN CIENCIAS**

JOSE LUIS GARCIA PUGA

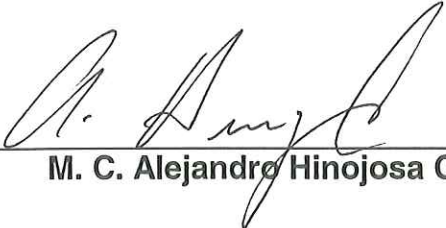
ENSENADA, B. C., JUNIO DEL 2000.

TESIS DEFENDIDA POR

JOSÉ LUIS GARCÍA PUGA

y aprobada por el siguiente comité

Director de Comité



M. C. Alejandro Hinojosa Corona

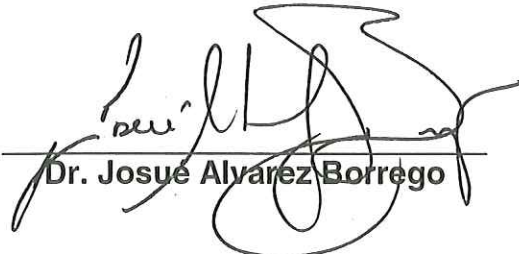
Miembros del Comité



Dr. Arturo Martín Barajas



M.C. Jorge Torres Rodríguez



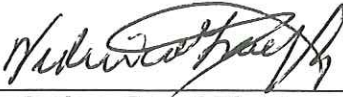
Dr. Josué Álvarez Borrego

Jefe del Depto. de Geología

Director de Estudios de Posgrado



Dra. Margarita López Martínez



Dr. Federico Graef Ziehl

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA
Y DE EDUCACIÓN SUPERIOR DE ENSENADA**



**DIVISIÓN CIENCIAS DE LA TIERRA
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA**

**Geomorfología e hidrología superficial entre Puertecitos y San
Luis Gonzaga, Baja California, apoyados en sensores remotos y
modelos digitales de elevación.**

TESIS

Que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de MAESTRO
EN CIENCIAS presenta:

JOSE LUIS GARCIA PUGA

Ensenada, Baja California, México. Junio del 2000

RESUMEN de la tesis de **JOSÉ LUIS GARCIA PUGA**, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de **MAESTRO EN CIENCIAS** en Ciencias de la Tierra con especialidad en **GEOLOGÍA**. Ensenada, Baja California, México. Junio del 2000.

Geomorfología e hidrología superficial entre Puertecitos y San Luis Gonzaga, Baja California, apoyados en sensores remotos y modelos digitales de elevación.

En este trabajo se realizó un estudio geomorfológico y de hidrología superficial en una franja costera de 100 km de longitud por 30 km de ancho entre Puertecitos y San Luis Gonzaga, en la vertiente oriental de la Península de Baja California, utilizando técnicas de percepción remota (PR) y sistemas de información geográfica (SIG). La zona de estudio es una región desértica delimitada por el escarpe del Golfo de California y las cuencas hidrológicas regionales.

Para el análisis geomorfológico, se fusionó un modelo digital del terreno (MDT) con una imagen satelital Landsat TM para generar 6 estereopares sintéticos, que fueron fotointerpretados para delimitar las unidades geomorfológicas con los criterios establecidos por Zinck (1989) obteniendo un total de 13 tipos de geoformas distintas distribuidas en 54 polígonos, destacando las mesetas del Plateau Matomí por su gran extensión.

Se aplicaron técnicas de análisis al MDT a través de los SIG extrayendo información de las pendientes y orientaciones del relieve del terreno. Los valores de las pendientes se agruparon con los criterios propuestos por Demek (1972) que están enfocados al aprovechamiento del uso de suelo en base a la pendiente. El 61% de la zona de estudio está formada por relieves con pendientes que oscilan entre el 0 y el 9% agrupadas en tres clases: las planicies (0-1%), pendientes ligeras (1-4%) y suavemente inclinadas (4-9%). Las planicies costeras se localizan al Norte de Puertecitos, en el Huerfanito, Punta Bufeo y San Luis Gonzaga, así como los valles aluviales de Valle Chico y los llanos de San Fermín. Las pendientes ligeras se localizan en las partes inferiores de los pie de montes a lo largo de la línea de costa y valles aluviales. Las pendientes suavemente inclinadas en las partes más altas de las planicies costeras en el pie de monte.

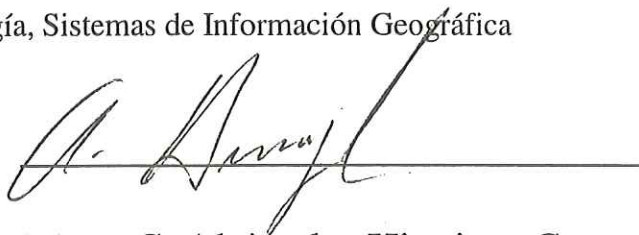
El Plateau Matomí, esta compuesto de mesetas basculadas preferentemente hacia el Este, influenciado por un sistema de fallas normales con orientación NNW. Se cuantificó el grado de inclinación así como la orientación de los bloques, apoyados con herramientas del SIG que operaron sobre el MDT, encontrando un patrón perpendicular entre la orientación de las fallas y el basculamiento de los bloques, predominando pendientes con valores del 3-6%.

Para la caracterización de la hidrología superficial se aplicaron tres metodologías apoyadas con herramientas de SIG, que operaron sobre el MDT. Con el método desarrollado por Ferdi Hellweger (1997) se obtuvieron un total de 9 cuencas mientras que con el método propuesto por Charles Ehlschlaeger (1991) se obtuvieron 22. La delimitación de las cuencas con estos dos métodos, discrepa con la información propuesta

por el INEGI en su carta hidrológica 1:1,000,000, coincidiendo marginalmente en la delimitación. Con el tercer método, programa Rivertools, se calculó para cada una de las 22 cuencas, la clasificación jerárquica de Horton-Strahler, la densidad del drenaje, representación gráfica de la red hidrológica y el perfil del arroyo principal.

Palabras clave: Geomorfología, Hidrología, Sistemas de Información Geográfica

Resumen aprobado por:

A handwritten signature in dark ink, appearing to read 'A. Hinojosa', is written over a horizontal line.

M. en C. Alejandro Hinojosa Corona
Director de tesis

ABSTRAC of the thesis of JOSE LUIS GARCIA PUGA , presented as partial requirement to obtain the MASTER IN SCIENCES grade in GEOLOGY. Ensenada Baja California, June 2000

Geomorphology and superficial hydrology between Puertecitos y San Luis Gonzaga, Baja California, from remote sensors and digital elevation models.

A geomorphologic and superficial hydrologic study was conducted on a coastal zone of 100 km length and 30 km width between Puertecitos and San Luis Gonzaga, on the eastern slopes of the Baja California Peninsula, using remote sensing techniques and geographic information systems (GIS). The study area is a desert region delimited by the Gulf of California escarpment and the regional watersheds.

For the geomorphologic analysis, a digital elevation model (DEM) was fused with a LANDSAT Thematic Mapper image to produce 6 synthetic stereopairs, that were photo interpreted to delineate the geomorphologic units using the Zinck(1989) model, obtaining 13 different types of landscape distributed in 54 units, standing out the Matomí Plateau.

The terrain slope and aspect were calculated using analysis tools from the GIS that operate over the DEM. The slope values were grouped according to a scheme proposed by Demek(1972) that establishes a relationship between land use suitability and slope of the terrain. According to this scheme, 61% of the study area is suitable for its use, with slopes ranging between 0 and 9% and grouped in three classes: plains (0-1%), light slopes (1-4%) and slightly tilted(4-9%). The coastal plains are located north of Puertecitos, in el Huerfanito, Punta Bufeo and San Luis Gonzaga, and the alluvial valleys are in Valle Chico and in Los llanos de San Fermín. The light slopes are located in the lower parts of the piedmonts alluvial plains along the coastline and on the alluvial valleys. The slightly tilted terrain can be found in the upper parts of the coastal plains in the piedmonts.

The Matomí Plateau is formed by tilted blocks facing mainly to the east, influenced by a normal faulting system with a NNW orientation. The slope and orientation of the tilted blocks were evaluated from the DEM using tools from the GIS, finding a perpendicular pattern between the faults and the tilted blocks outstanding slope values in the range of 3-6%.

For the superficial hydrology characterization, three methodologies were applied over the DEM with the aid of the GIS. With the method developed by Ferdi Hellweger (1997), 9 watersheds were obtained meanwhile 22 were found with the Charles Ehlschlaeger's (1991) method. The limits of the watersheds obtained by these two methods, differ from those published by INEGI's 1:1,000,000 hydrologic map, coinciding marginally in its outline. The third hydrologic tool was the RiverTools program, that calculated for each of the 22 watersheds, the Horton-Strahler hierarchical classification of

the hydrologic network, the drainage density, plots of the hydrologic network and topographic profiles along main streams

Keywords: Geomorphology, hydrology, Geographic Information System

DEDICATORIA

Este nuevo paso en mi vida no hubiera podido ser concluido sin el apoyo moral de las personas a quienes más estimo, mis padres “*Maria Elena Puga Gómez*” y “*Luis García Rodríguez*” quienes me enseñaron a emprender retos por las cosas que valen la pena por alcanzar en esta vida.

También a mis Hermanos quienes me apoyan en mis proyectos de vida, a quienes les agradezco infinitamente el contar con sus atenciones: Juventina, Laura Renata, Sandra, Omar Benjamín y Lucía

Sin dejar de agradecer a dos personas en especial quienes me dieron todo su calor humano incondicional en los momentos más inesperados, Norma Angélica Ledesma Jiménez y Nayeli García Puga.

AGRADECIMIENTOS

A mi director de tesis y amigo Alejandro Hinojosa Corona, quien me apoyo con su valiosa cooperación en la conclusión de este trabajo, con sus consejos, apoyo moral y enseñanzas.

A todos los maestros de este centro de investigación, quienes me apoyaron en momentos de incertidumbre. En especial a Arturo Martín Barajas, quien fue una persona quien me incentivo a continuar en esta institución, con su amistad y comentarios.

A todos mis compañeros que se convirtieron en mi segunda familia en esta institución, los cuales si los nombrara a cada uno de ellos seria interminable la lista.

Al Sistema de Investigación del Mar de Cortes (SIMAC), quien apoyo el proyecto "Caracterización de recursos naturales de la zona costera entre Puertecitos y bahía de san Luis Gonzaga, Baja California, apoyados imágenes multiespectrales de alta resolución"

Al CONACYT quien apoyo el proyecto "Caracterización del paisaje en la vegetación y el uso del suelo, y sus cambios n las tres últimas décadas apoyados con imágenes Landsat MSS, en el Estado de Baja California" con el número 26661-B.

Al Centro de Investigación Científica de Educación Superior de Ensenada

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.

A los técnicos del departamento de geología, José de Jesús Mojarro Bermúdez y Luis Carlos Gradilla Martínez.

CONTENIDO

I	INTRODUCCIÓN.....	1
II	ANTECEDENTES.....	3
III	OBJETIVOS.....	4
IV	LOCALIZACIÓN.....	5
	IV.1 Hidrología.....	6
	IV.2 Marco geológico.....	7
	IV.3 Marco geomorfológico.....	11
V	MATERIALES Y MÉTODOS.....	12
	V.1 Materiales.....	12
	V.2 Métodos	15
	V.3 Contexto cartográfico	16
	V.4 Compuesto en falso color de la imagen LANDSAT TM.....	17
	V.5 Georreferencia de la imagen Landsat TM.....	18
	V.6 Generación de estereopares sintéticos.....	20
	V.7 Análisis Geomorfológico.....	22
	V.8 Análisis de pendientes y aspecto del terreno.....	24
	V.9 Hidrología superficial y delimitación de cuencas.....	26
	V.10 Clasificación de arroyos.....	29
VI	RESULTADOS.....	30
	VI.1 Análisis geomorfológico a través de estereopares.....	30
	VI.2 Análisis de pendientes del terreno.....	47

VI.3 Análisis de la orientación de la pendiente.....	53
VI.4 Análisis de la pendiente y su orientación en el Plateau Matomí.....	56
VI.5 Hidrología superficial.....	62
VII DISCUSIONES.....	80
VIII CONCLUSIONES.....	92
BIBLIOGRAFÍA.....	94
ANEXOS.....	99

LISTA DE FIGURAS

FIGURA	PAGINA
1 División política de México y E.U.A, con la división municipal para el estado de Baja California, indicándose con un recuadro la localización de la zona de estudio dentro del municipio de Ensenada	3
2 Fisiografía de Baja California, tomada y modificada de INEGI (1995)....	6
3 Cuencas y subcuencas establecidas por INEGI (1984; 1995).....	8
4 Esquema gráfico de la metodología, para el análisis geomorfológico e hidrológico de la zona de estudio	16
5 Cobertura geográfica de la imagen Landsat TM y del espaciomapa de la zona de estudio, mostrándose la ubicación de los puntos de control terrestre (PCT) utilizados en el proceso de georreferencia de la imagen.....	19
6 Imagen Landsat TM con coordenadas de pase 38 renglón 39 del sistema WRS2 tomada el 20/Julio/1987 donde se enmarca la franja costera entre Puertecitos y San Luis Gonzaga, Baja California	20
7 Descripción gráfica de los cálculos efectuados por los métodos propuestos por Hellweger (1997) y Ehlschlaeger (1989), y la diferencia en la codificación en la dirección del flujo.....	28
8 Clasificación de arroyos con el esquema de Horton-Strahler	30
9 Extensión geográfica de los estereopares sintéticos generados.....	31
10 Vista en perspectiva donde se muestran las planicies, sierras bajas, mesetas, valles intramesetas, y valles aluviales al norte de la zona de estudio. Se aprecia el abanico aluvial del arroyo Matomí que desemboca al Golfo de California y la localidad de Puertecitos. Al N se puede distinguir la Sierra de San Fermín y al NE los llanos de San Fermín.....	35
11 Vista en perspectivas, identificándose las unidades de mesetas(Matomí), Volcán (Prieto), Sierra alta y media (sierra Santa Isabel), planicies (el Huerfanito, San Judas).....	38
12 Vista en perspectiva de las geoformas al sur de la zona de estudio, presentándose las planicies al norte de Punta Bufe, San Luis Gonzaga, constituidas de sedimentos de rocas graníticas y volcánicas, provenientes de la S. Santa Isabel, así como los cuerpos volcánicos en la parte norte de la S. Calamajué.....	41
13 Unidades geomorfológicas en la franja costera entre Puertecitos y San Luis Gonzaga fotoidentificadas a partir de estereopares sintéticos.....	46
14 Distribución espacial de las pendientes en % de todo el MDT, delimitándose la zona de estudio con la línea blanca. las localidades se abrevian VC (Valle Chico), LSF (Llanos de San Fermín), AM (arroyo Matomí), P (Puertecitos), PM (Plateau Matomí), VP (Volcan Prieto), SI (sierra Santa Isabel), SJ (San Judas), PB (Punta Bufe), SLG (San Luis Gonzaga).....	48

FIGURA	LISTA DE FIGURAS (Continuación)	PAGINA
15	Histograma e histograma acumulativo de la pendiente en valores porcentuales para el MDT de la zona de estudio delimitada por una línea blanca de la figura 14.....	49
16	Proporción de pendientes según el esquema de Demek(1972).....	50
17	Distribución de la pendiente clasificada con el esquema de Demek (1972).....	52
18	Iluminación artificial del modelo digital del terreno (MDT) ubicando la fuente de luz a 50° sobre el horizonte con un azimut de 75°. La zona de estudio está indicada con una línea oscura	54
19	Histograma de la orientación de la pendiente para la zona de estudio.....	56
20	Foto de mesetas basculadas del Plateau Matomí, vista hacia el sur en cercanías del Volcán Prieto. En esta foto se observa físicamente la inclinación de los bloques hacia el Este	57
21	Segmentación de la zona de mesetas del plateau Matomí, en un arreglo de 3 x 3 y límites de las zonas de influencia de los arroyos El Canelo, Los Hemes y sus tributarios indicadas en color oscuro, eliminadas en el análisis de la pendiente y su orientación. El área achurada con puntos es la considerada en el análisis.....	58
22	Orientación de la pendiente en bloques del plateau Matomí (análisis del aspecto). La ventana de análisis esta subdividida en 9 partes donde se muestran los histogramas de orientación de cada ventana	59
23	Histograma de las pendientes de los recuadros de la figura 24. Los valores son truncados a partir del 50% por su ausencia de representatividad de las pendientes mayores	60
24	Red hídrica calculada por el método de Hellweger y comparación con la hidrología superficial digitalizada de las cartas 1:50,000 de INEGI. Los puntos indican la ubicación del cruce de arroyos con la terracería entre la Bahía de San Luis Gonzaga y Puertecitos.....	65
25	Cuencas calculadas por el método de Hellweger	66
26	Límites de las cuencas propuestas por INEGI (1985) en la carta hidrológica escala 1:1'000,000 y límites obtenidos del procesado del MDT con el método Hellweger (1997). La diferencia se debe al mayor nivel de generalización de la información en la carta de INEGI.....	67
27	Diferencias en la delimitación de las cuencas por ambos métodos. Los parteaguas coinciden en la mayoría de los casos, pero también existen ligeras diferencias. Se enumeran las cuencas de cada método, diferenciado en itálicas las del método de Ehlschlaeger.....	69
28	Cuencas obtenidas por el método de Ehlschlaeger, tomándose como la delineación final de los parteaguas	71

FIGURA	LISTA DE FIGURAS (Continuación)	PAGINA
29	Delineación de las cuencas finales obtenidas por el método Ehlschlaeger y la hidrología superficial por el método Hellweger. Ubicación de los pozos que abastecen a las poblaciones del área	72
30	Clasificación de los tributarios según el sistema de Horton-Strahler. En la parte inferior de cada histograma se enumeran las cuencas según la tabla IX y las frecuencias de los arroyos. a) esquema gráfico de la clasificación del orden, b) histogramas de los órdenes.....	74

LISTA DE TABLAS

TABLA	PAGINA
I Sistema de clasificación de geoformas, tomado de Zinck (1989).....	23
II Clasificación sinóptica de geoformas.....	24
III Relación entre el número del estereopar, nombre de la cuenca con su clasificación de INEGI, escala del estereopar y nombre de los archivos gráficos que los almacenan	32
IV Criterios visuales para la clasificación de geoformas.....	33
V Resultados de áreas y perímetros de cada geoforma en el área de estudio	45
VI Clasificación de acuerdo al rango de la pendiente, tomada de Demek (1972).....	50
VII Cuencas hidrológicas obtenidas por el Método Hellweger con su respectiva área	64
VIII Relación entre las cuencas obtenidas por el método de Hellweger y por el de Ehlschlaeger. Las cuencas obtenidas el primero engloba a las del segundo	70
IX Número, nombre, extensión y perímetro de las cuencas hidrológicas obtenidas para la zona de estudio por el método de Ehlschlaeger. El orden de las cuencas sigue su distribución de norte a sur	70
X Índices hidrológicos calculados con Rivertools para cada cuenca.....	78

Geomorfología e hidrología superficial entre Puertecitos y San Luis Gonzaga, Baja California, apoyados en sensores remotos y modelos digitales de elevación

I.- INTRODUCCIÓN

Los gobiernos de los estados a través de sus municipios, promueven el desarrollo económico y social, procurando que no se desequilibre el medio ambiente, estableciendo esquemas normativos de planificación ambiental. El Plan de Ordenamiento Ecológico del Estado Baja California define un marco general de referencia, que garantiza el uso adecuado y la conservación de los recursos naturales, sin embargo, el crecimiento económico ha requerido elaborar planes más específicos, como los siguientes:

- Programa Regional de Desarrollo Urbano, Turístico y Ecológico del Corredor Costero Tijuana-Ensenada
- Programa Regional de Desarrollo Urbano, Turístico y Ecológico del Corredor Costero San Felipe-Puertecitos.
- Esquema de Desarrollo Urbano de San Quintín.

El Municipio de Ensenada, es una región que aún requiere conocer la distribución de los recursos, con una extensión territorial cercana a los 53,000 km², representa el 74% del Estado de Baja California y el 2.6% del territorio Nacional. Una de las primeras etapas en este proceso, es la caracterización de unidades geomorfológicas homogéneas (Bocco-Verdinelli y Ortiz, 1994; Butler, 1998, Cooke y Doornkamp, 1990). Así mismo, el evaluar

la disponibilidad de agua, que en zonas desérticas es uno de los factores primordiales para impulsar el desarrollo, por ello, es de suma importancia conocer la hidrología superficial y subterránea para administrar eficientemente este recurso.

Las ciencias que se enfocan a estudiar a la Tierra tales como la topografía, Geología, Geomorfología etc., con los avances tecnológicos, han cambiado la forma de interpretación de la superficie del terreno, (Flood y Guteluis, 1997; Henderson y Xia, 1997; Monne *et al.*, 1997). Estas ciencias han incorporado el uso de fotografías aéreas digitales e imágenes obtenidas por satélites que observan a la Tierra. Las imágenes de satélite, junto con los Sistemas de Información Geográfica (SIG), permiten generar productos cartográficos que proporcionan nuevas perspectivas en el análisis territorial, adaptándose a las necesidades de los usuarios (Monne *et al.*, 1997).

En este estudio se utilizan herramientas de SIG y Percepción Remota (PR) para caracterizar la zona costera entre la región de Puertecitos y San Luis Gonzaga (PSLG) (figura 1). Clasificando la geomorfología y la hidrología superficial a partir del procesamiento de un modelo digital del terreno (MDT), que es fusionado con la imagen de satélite para producir estereopares sintéticos. La generación de estereopares sintéticos (Batson *et al.*, 1976) son de suma utilidad en la visualización y análisis de las geoformas, y que en este trabajo fueron generados para la fotointerpretación.

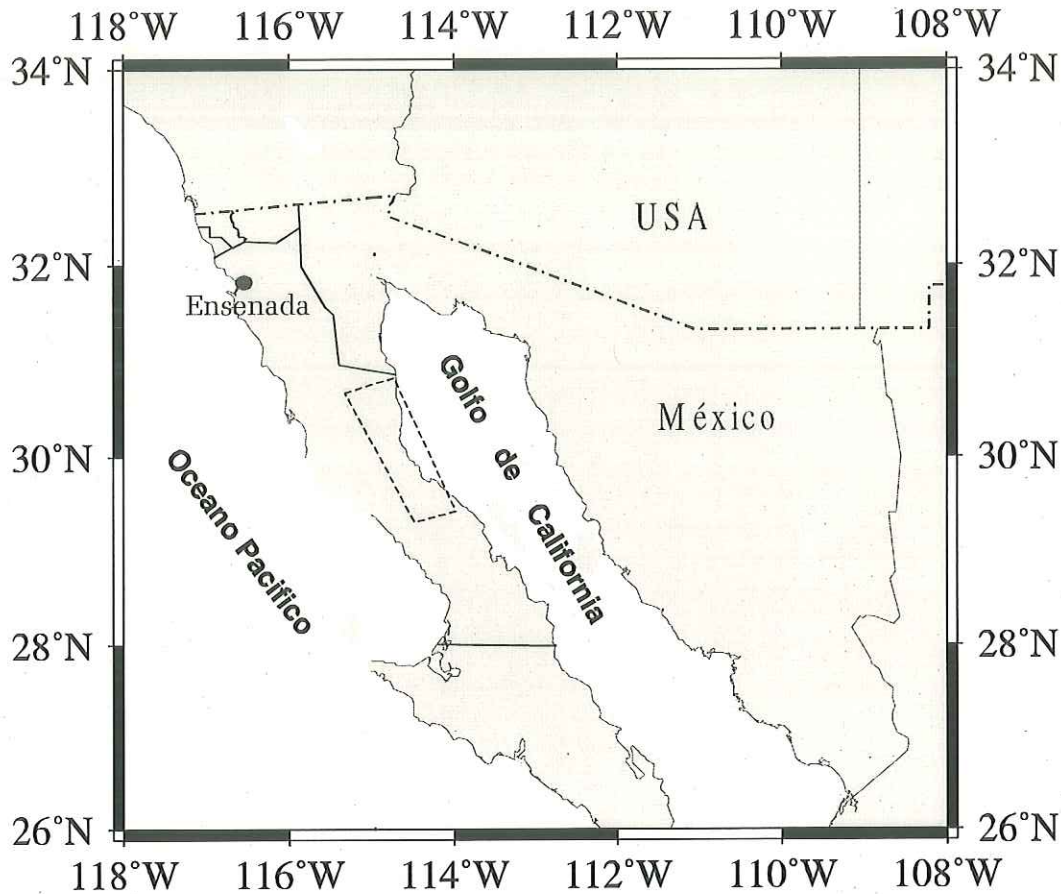


Figura 1. División política de México y E.U.A, con la división municipal para el estado de Baja California, indicándose con un recuadro la localización de la zona de estudio dentro del municipio de Ensenada.

II.- ANTECEDENTES

En la década de los ochentas y principalmente durante los noventas, los Sistemas de Información Geográfica, las imágenes de satélite y los modelos digitales del terreno, se aplicaron cada vez más en estudios de impacto ambiental, planeación regional y de zonas urbanas, cambios en la vegetación y uso del suelo, exploración de recursos no renovables y en estudios de riesgo geológico (Longley y Batty, 1996; ER-Mapper, 1995; Bonham-Carter, 1997; Birkin *et al.*, 1996; Berry, 1997; López Blanco, 1994). Estas herramientas

contribuyen a la sistematización de los procesos de análisis espacial, facilitando las tareas de planeación regional y de soporte en la toma de decisiones.

El presente estudio forma parte del proyecto “Caracterización de recursos naturales de la zona costera entre Puertecitos y Bahía de San Luis Gonzaga, Baja California, apoyados en imágenes multiespectrales de alta resolución”. Este proyecto tiene financiamiento del Sistema de Investigación Regional del Mar de Cortés (SIMAC) y tiene por objetivo realizar el estudio geomorfológico e hidrológico superficial. Los resultados del proyecto están enfocados a apoyar los planes de desarrollo de esta franja costera que es la extensión hacia el sur del corredor turístico San Felipe-Puertecitos en el noreste de Baja California.

III.- OBJETIVOS

El principal objetivo es caracterizar la geomorfología e hidrología superficial de la franja costera entre Puertecitos y Bahía de San Luis Gonzaga (PSLG), a través del procesado de una imagen Landsat TM (Thematic Mapper) y de un modelo digital del terreno (MDT).

Los objetivos particulares son:

- Análisis de las pendientes y orientación del relieve a partir del procesado del MDT.
- Generación de modelos estereoscópicos sintéticos a través de la fusión de una imagen Landsat TM y un MDT para la fotointerpretación de la geomorfología.
- Análisis y extracción de la hidrología superficial a través de la aplicación de 3 métodos distintos que operan sobre el MDT.

- Generación de un espaciomapa a partir de la sobreposición de una imagen Landsat TM, la geomorfología y la hidrología superficial.
- Integración de la información espacial generada en un Sistema de Información Geográfica (SIG).

IV.- LOCALIZACIÓN

El área de estudio es una franja costera en la margen oriental de la península de Baja California de aproximadamente 100 km de longitud por 30 km de ancho en la zona meridional del estado (figura 1). Se localiza entre los paralelos 29°15', 30°45' N y los meridianos 115°30', 114°15' W, dentro de la delegación municipal de Puertecitos del municipio de Ensenada. Puertecitos y San Luis Gonzaga son las localidades de esta región con mayor número de habitantes, donde la pesca y la administración de campos turísticos son las principales actividades económicas.

La zona se ubica en un 95% en la sub-provincia fisiográfica de las sierras de Baja California (INEGI, 1982; 1984; 1995), solo una porción en la parte norte se ubica en la subprovincia del desierto de Altar, que predomina en el NE de la entidad (figura 2). Las partes más altas de las sierras peninsulares en el norte de Baja California alcanzan 3000 metros sobre el nivel del mar (msnm) en la Sierra San Pedro Mártir.

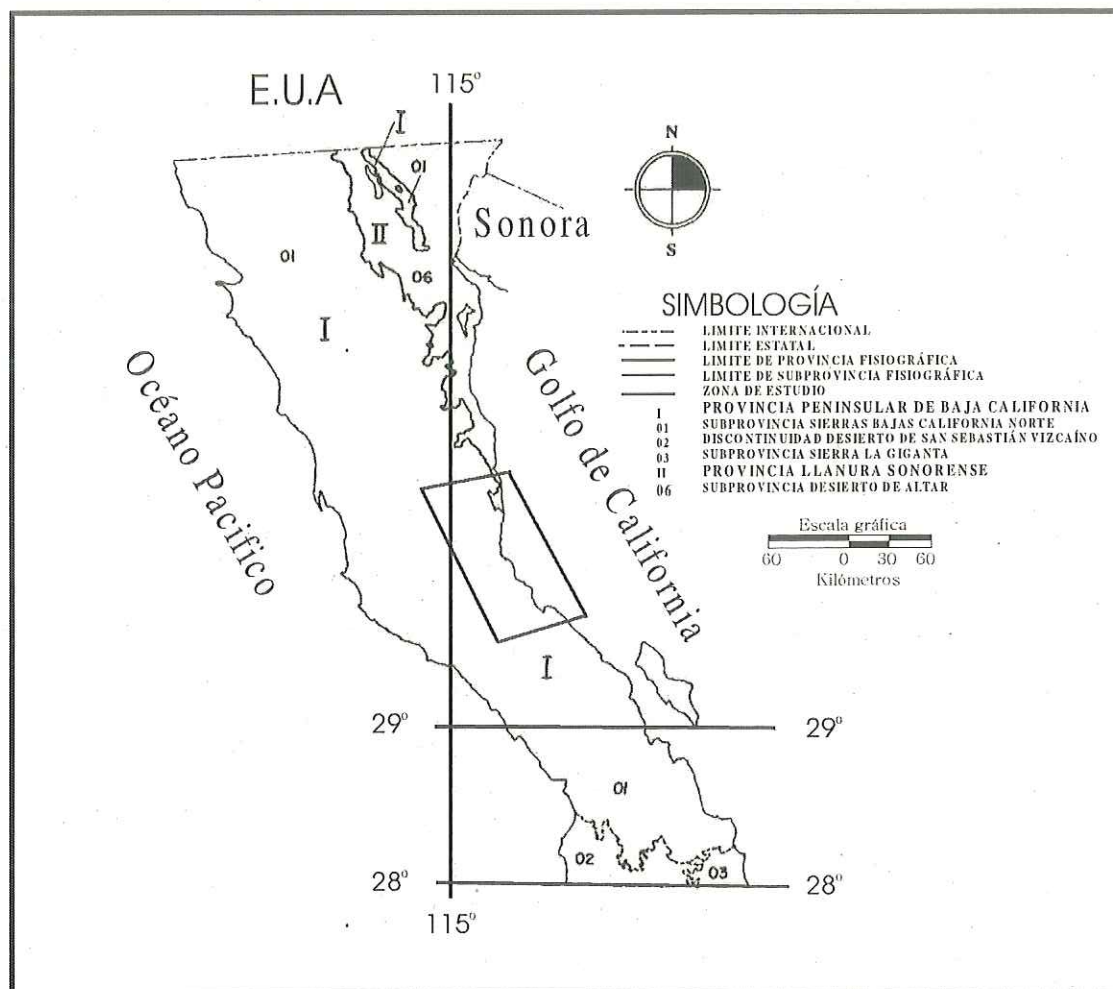


Figura 2. Fisiografía de Baja California, tomada y modificada de INEGI (1995).

IV.1.- Hidrología

Para efectos de una primera aproximación en la delimitación hidrológica, se adoptó el esquema de INEGI (1984; 1995), que define dos regiones hidrológicas; la región RH4 (Baja California Noreste) y la región RH5 (Baja California Centro-Este). La región

hidrológica RH4 abarca la zona de estudio a través de la cuenca regional A (Agua Dulce – Santa Clara) y sus subcuencas “a, b y c” cubriendo una extensión territorial de 2,498 km². La precipitación promedio anual de la cuenca regional A es de 118 mm. La región hidrológica RH5 está compuesta de dos cuencas regionales, la zona de estudio se ubica en la cuenca regional C (Arroyo Calamajué y otros) la cual tiene una precipitación anual de 94 mm. Esta cuenca a su vez está subdividida en las subcuencas “c y d” y entre ambas abarcan una extensión territorial de 1,044 km². La zona de estudio comprende entonces un total de ~3,540 km² (figura 3).

IV.2.- Marco geológico

La región de Puertecitos – Bahía San Luis Gonzaga comprende dos provincias volcánicas distintas. La Provincia Volcánica de Puertecitos, al norte, está compuesta por tres grupos o episodios volcánicos asociados a la apertura del Golfo de California que sobreyacen a centros de emisión del Mioceno medio atribuidos al arco volcánico (Martín Barajas et. al., 1993, 1995; Stock, 1989, Stock *et al.*, 1991, Lewis, 1995). La unidad más característica del primer evento (~12 Ma) es una toba de extensión regional (Toba San Felipe) cuya fuente de emisión se localiza al norte de la zona de estudio (Stock *et al.*, 1999). Esta unidad no aflora extensivamente en el área y está sepultada por las rocas volcánicas más jóvenes. El segundo evento volcánico ocurrió hacia los 6 Ma y las rocas afloran extensivamente en el norte del área de estudio a lo largo del Arroyo Matomí, donde se encuentran las facies proximales de flujos piroclásticos y campos de domos riolíticos (Stock *et al.*, 1991; Martín-Barajas *et al.*, 1995). Los domos riolíticos y las tobas de ~6 Ma están

parcialmente cubiertos por los depósitos volcánicos más jóvenes (~3 Ma), aunque afloran en Sierra San Fermín y hacia el poniente del Arroyo Matomí.

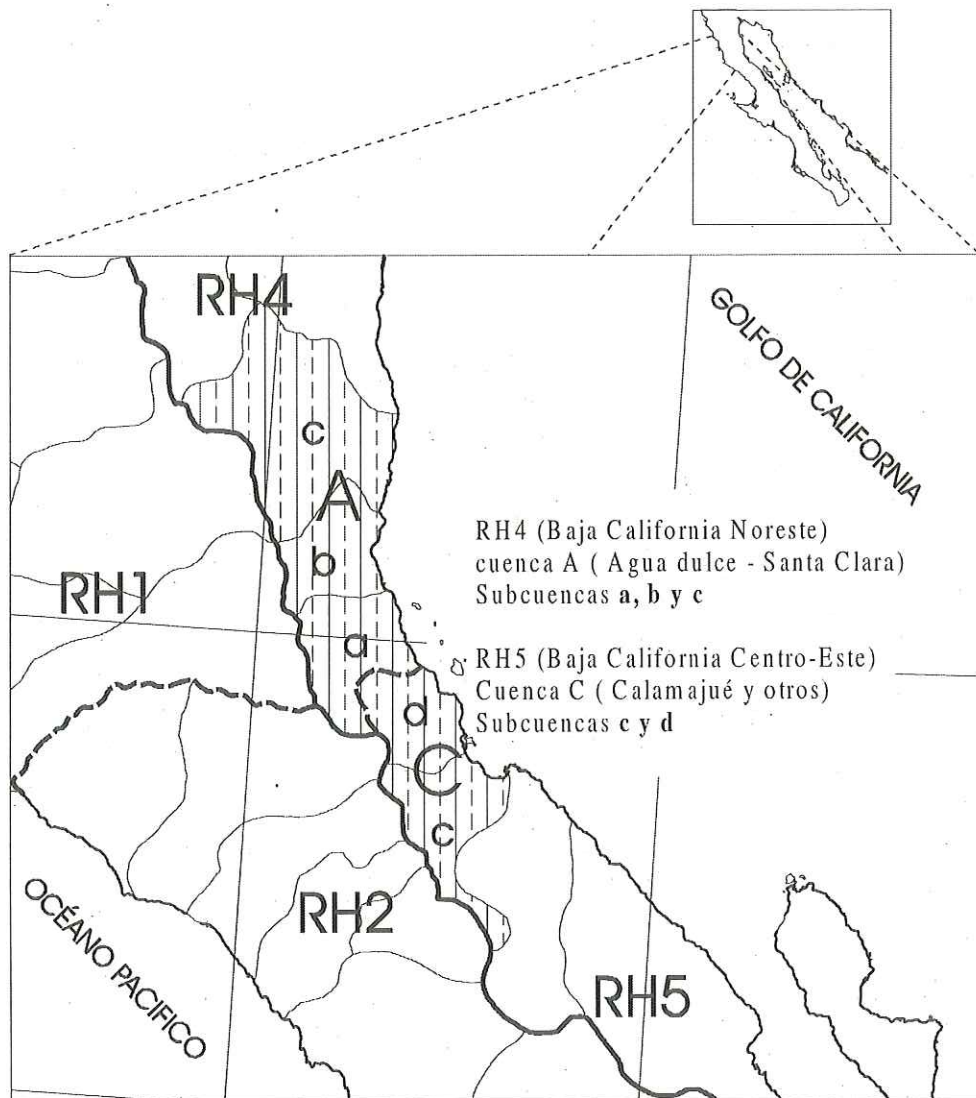


Figura 3. Cuencas y subcuencas establecidas por INEGI (1984; 1995).

El evento volcánico más joven de carácter regional consiste en una serie de tobas ácidas que cubrieron la paleotopografía desarrollada en las rocas más antiguas. Son tobas con diferente grado de soldamiento que forman las mesas entre Puertecitos y la región al sur de El Huerfanito.

La Provincia Volcánica de Puertecitos está afectada por un patrón de fallas normales con orientación NNW a NNE (Martín-Barajas y Stock, 1993). Las fallas tienen poco desplazamiento vertical (<100 m) y forman un arreglo cerrado. Estas fallas producen el basculamiento hacia el este de bloques con cimas planas definidas por las tobas de 3 Ma.

Hacia el sur de la PVP las tobas de ~3 Ma se acúñan sobre un complejo volcánico del arco Miocénico. Este complejo incluye un paquete de >200 m de espesor de sedimentos volcánicos cubiertos por flujos de lava. También incluye algunos cuellos volcánicos de pendientes escarpadas.

El campo volcánico de San Luis Gonzaga consiste en una secuencia estratificada de rocas piroclásticas de espesor variable entre 500 y 200 m y de edad entre 15 y 17 Ma. La fuente de emisión se localiza en la zona costera (Martín-Barajas *et al.*, 2000) y este paquete se adelgaza hacia el poniente donde sobreyace al basamento granítico mesozoico. Este paquete piroclástico está cubierto con flujos de lava de extensión regional que surgieron de volcanes escudo localizados al oeste del escarpe principal del Golfo en esta latitud. La edad de los flujos de lava en la zona de estudio es ~14-15 Ma por lo que ambas unidades han sido atribuidas al volcanismo de arco previo a la apertura del Golfo de California. El evento volcánico más joven son domos dacíticos y brechas que intrusionan y cubren

localmente a los flujos de lava y al paquete de rocas volcanoclásticas. Su edad aún no ha sido determinada (Martín-Barajas *et al.*, 2000).

Las rocas sedimentarias son principalmente depósitos de abanicos aluviales con aportación de sedimentos provenientes del continente hacia el oriente. Se interdigitizan con depósitos marinos someros del Plio-Pleistoceno, que alcanzan espesores de hasta 120 m en la región de San Luis Gonzaga.

La base de la secuencia sedimentaria aflora en la zona costera alrededor de los domos dacíticos así como en colinas de rocas más antiguas. En la base contienen areniscas con planos de estratificación que intersectan el paleorrelieve formado por islotes y planicies de marea. Los depósitos marinos gradan hacia el poniente a depósitos de areniscas de grano grueso, conglomerados y brechas de fuentes locales, representando ambientes de abanicos aluviales y depósitos de talud. La parte media inferior de la secuencia marina está comprendida principalmente por lodolitas y areniscas de grano fino, siendo las evidencias de una transgresión de la línea de costa hacia el poniente.

Las geoformas en la zona costera entre el Arroyo Matomí hasta el sur de Bahía de San Luis Gonzaga están integradas por sierras, valles y planicies costeras, que son distribuidas a lo largo del escarpe principal del golfo. En la región de la provincia volcánica de Puertecitos las geoformas predominantes son mesetas volcánicas basculadas hacia el oriente y sierras bajas separadas por valles intramesetas.

IV.3.- Marco geomorfológico

La zona de estudio se localiza dentro de la provincia geomorfológica de la depresión del Golfo (c.f. Gastil *et al.*, 1975). El límite occidental de esta provincia fisiográfica es el escarpe principal del Golfo, que separa a esta depresión de la porción tectónicamente estable de la península hacia el oeste. Este escarpe varía su expresión topográfica a lo largo de la península. En la parte norte de la zona de estudio la falla de San Pedro Mártir define este escarpe, pero hacia el sur su expresión morfológica se suaviza dramáticamente por el plateau del Matomí. Este último está formado por rocas volcánicas que se extienden por mas de 40 km a través del escarpe hacia el oriente. Esta región es también definida por Gastil *et al.* (1975) como el Bloque de Puertecitos. Hacia el oriente el bloque está cortado por una serie de fallas de desplazamiento vertical y de orientación NNW que producen bloques basculados hacia el Este. El límite sur del bloque de Puertecitos está definido por el afloramiento del basamento cristalino y el acúñamiento de las rocas volcánicas.

El bloque de San Luis Gonzaga, ubicado al sur, es básicamente una depresión de 10 km de ancho por 80 km de largo. El límite suroeste es el escarpe principal del Golfo que, en este sitio, consiste en un escalón de ~800 m en el basamento granítico, en una distancia de 10 km a través del escarpe. Al sur, este bloque está separado de la cuenca del Arroyo Calamajué por sierras de basamento cristalino alineadas N-S (e.g. Sierra San Francisquito, Sierra Calamajué). El bloque San Luis Gonzaga contiene un campo volcánico pequeño que produce una topografía rugosa que contrasta con las planicies aluviales que rodean al campo volcánico y que alcanzan la base del escarpe a una altura sobre el nivel del mar de ~120 m. La costa central de este bloque presenta una topografía pronunciada en la zona de

San Luis Gonzaga y hasta Punta Bufeo. Hacia el norte y hacia el sur el litoral es predominantemente arenoso con playas extendidas. El aluvión presenta terrazas en sedimentos aluviales y marinos Plio-Cuaternarios que actualmente son disectadas por los arroyos modernos (Fletcher *et al.*, 1997)

V.- MATERIALES Y MÉTODOS

V.1.- Materiales

El desarrollo de la presente tesis fue muy demandante en poder de cómputo y se requirió de equipo avanzado para estas tareas, el cual fue proporcionado por el laboratorio de percepción remota y sistemas de información geográfica de la División de Ciencias de la Tierra y departamento de Telemática del CICESE. Las características del equipo utilizado son las siguientes:

- Estación de trabajo marca Sun Microsystems, modelo Sparc 10, con 96 Mb de memoria y una capacidad de disco duro de 6 Gbytes.
- Super computadora Origin 2000 de Silicon Graphics (SGI), con 10 procesadores R10000 de 195 MHZ cada uno con 4 MB de memoria cache, y un total de memoria de 1.25 Gb, discos SCSI que suman 40.9 GB;
- Estación de trabajo O2 de Silicon Graphics (SGI) con capacidad de almacenamiento en disco duro de 9Gbytes.
- Computadora tipo personal AMD-K6, 96Mb de memoria, disco duro de 6Gb.
- Tableta digitalizadora de 36 por 48 pulgadas marca Summagraphics.

- Graficador de inyección de tinta DesignJet 3500C con resolución de 600 puntos por pulgada e impresora HP LaserJet 5P.
- Equipo de posicionamiento global (GPS) trimble ScoutMaster®.
- Periféricos del CICESE para la lectura de cintas y respaldo de información.

Se trabajó en diversos sistemas operativos durante el proyecto, desde el ambiente Windows para las computadoras personales hasta las diferentes versiones de UNIX como son Linux Slackware para arquitecturas Intel, así como IRIX 6.3 para SGI y Solaris 5.7 para equipos SUN. Los programas de aplicación empleados para llevar a cabo el proyecto son los siguientes:

- Sistema de información geográfica Arc/Info versión 7.2
- Sistema de información geográfica ArcView versión 3.1
- Sistema de información geográfica GRASS 4.2 (Geographic Resource Analysis and Support System)
- Sistema de procesamiento de imágenes ERMAPPER 5.5a
- Paquete de análisis de hidrología superficial Rivertools 2.0

La información espacial utilizada fue la siguiente:

- Imagen del satélite Landsat sensor TM (Thematic Mapper) con seis bandas espectrales y resolución espacial de 28.5 m. Según el sistema de referencia mundial (WRS2), la imagen utilizada tiene la referencia de pase 38 y renglón 39, con clave individual LT5038039008720110 y corresponde a la fecha de 20/07/87 (para mayor información ver anexo 1). Una imagen TM, tiene una

cobertura territorial de un paralelogramo de 185 km por lado. Para una descripción más detallada de las características de las imágenes Landsat TM se puede consultar Richards (1986), Sabins (1987) y Vincent (1997).

- Un modelo digital de elevación de la zona de estudio también conocido como modelo digital del terreno (MDT). Existen diferentes métodos de representar digitalmente el relieve del terreno y el más común por su simplicidad y amplia distribución es aquel con representación en forma de una rejilla regular, que fue el esquema utilizado en este trabajo. El INEGI distribuye este tipo de información de toda la República Mexicana a través del disco compacto GEMA (Geomodelos de Altimetría), con un espaciamiento regular entre elementos de la rejilla de 3 segundos de arco. Para consultar sobre otros métodos de representación consultar Burrough (1991).
- Carta estatal fisiográfica de Baja California escala 1:1,000,000 (INEGI, 1984).
- Cartas topográficas y geológicas escala 1:50,000 con claves: h11b66, h11b67, h11b76, h11b77, h11b87, h11b88, h11d17, h11d18, h11d28, h11d29, h11d38, h11d39 (INEGI, varios años)
- Reporte Hidrológico del estado de Baja California (INEGI, 1995)

Se contó con el apoyo terrestre de los vehículos de doble tracción del parque vehicular del CICESE para las salidas de campo a la zona de estudio.

V.2.- Métodos

En la presente tesis se aplicaron varios métodos con diversas herramientas computacionales orientados al análisis geomorfológico e hidrología superficial utilizando un modelo digital de elevación y una imagen de satélite Landsat sensor TM (Thematic Mapper).

Con la imagen Landsat TM se generó un compuesto en falso color, que posteriormente fue fusionado con el MDT para producir estereopares sintéticos utilizados en la fotoidentificación de las geoformas.

Los procesos empleados en el análisis de la información se enfocaron en gran parte al análisis del MDT, extrayendo información de la pendiente del terreno y la orientación del relieve como una primera aproximación al análisis geomorfológico. Posteriormente, se enfocaron a la extracción de información de hidrología superficial (redes hidrológicas y delimitación de cuencas) por varios métodos. Como referencia de la hidrología superficial, se digitalizaron los arroyos de la zona de estudio de los mapas topográficos de INEGI escala 1:50,000 que cubren la zona (anexo 2).

El primer análisis hidrológico se realizó con el método de HEC-PREPRO, desarrollado por Hellweger (1997), para el SIG Arc/Info. El segundo análisis, fue el desarrollado con el método de Ehlschlaeger (1991) para trabajar con el SIG GRASS y por último, se utilizó el paquete computacional especializado en análisis hidrológico llamado Rivertools, que aplica los criterios propuestos por Horton (1932) y Strahler (1964) para la

caracterización de la hidrología superficial. La representación gráfica de la metodología y su organigrama se representa en la figura 4.

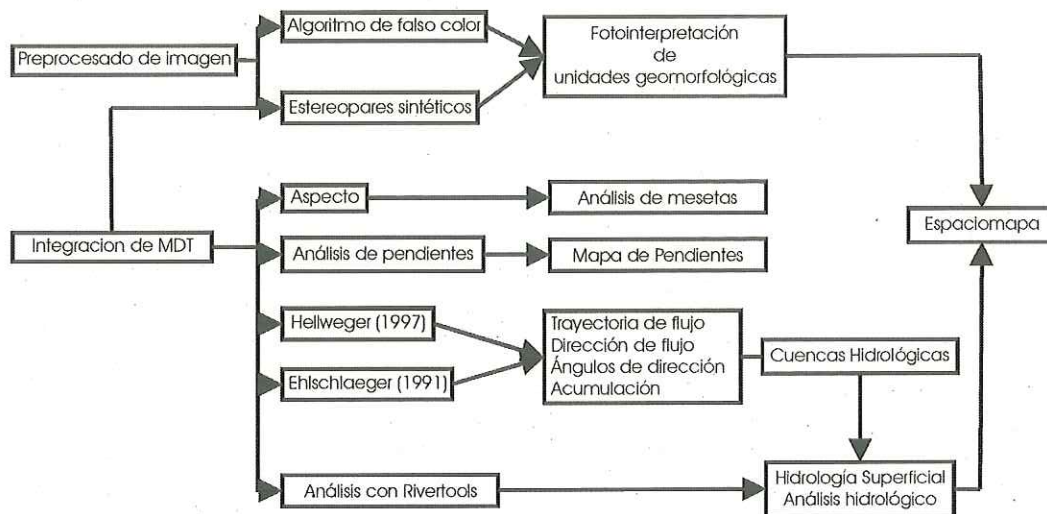


Figura 4. Esquema gráfico de la metodología, para el análisis geomorfológico e hidrológico de la zona de estudio.

V.3.- Contexto cartográfico

Cuando se busca combinar diversas fuentes de información espacial, es indispensable establecer un sistema de referencia común en el que los rasgos geográficos coincidan espacialmente y se encuentren en un mismo contexto cartográfico, por ello fue necesario someter toda la información espacial a la proyección cartográfica Universal Transversa de Mercator (UTM) zona 11 con datum horizontal Norte Americano de 1927 (NAD27). Tanto la imagen Landsat como el MDT fueron proyectados a este sistema de referencia. Para consultar las especificaciones de la proyección UTM ver a Snyder (1984) o McDonnell (1991).

V.4.- Compuesto en falso color de la imagen LANDSAT TM

Una imagen de satélite está constituida por una arreglo de celdas (X,Y), cada una de ellas almacena la reflectancia electromagnética registrada por el sensor, asignándole un valor numérico digital que representa un valor de brillo en una escala que varía entre 0 y 255, donde el valor 0 corresponde al mínimo de brillo y 255 al máximo, para cada una de las 7 bandas del sensor TM.

Hay dos tipos fundamentales de despliegue de imágenes (Richards, 1993). Una manera es utilizando una tabla de color en tonos de gris, donde al color negro le corresponde el valor 0 mientras que a los valores más altos les corresponde el blanco.

El segundo método, consiste en generar una imagen de color (falso color) en la cual se seleccionan tres bandas espectrales a las cuales se les asigna uno de los colores primarios (azul, verde y rojo). Cuando existen más de tres canales espectrales, se pueden realizar una serie de combinaciones de los colores primarios que permiten desplegar compuestos con colores sintéticos. Esta técnica es bastante útil y comúnmente utilizada para la interpretación geológica a partir de una imagen de satélite (Richards, 1993; Vincent, 1997; Sabins, 1987).

Se probaron varias combinaciones de bandas de manera empírica con el objeto de realzar los rasgos litológicos y geomorfológicos en la zona de estudio optando por la combinación de las bandas 5, 4 y 2 de la imagen TM en los canales rojo, verde y azul, respectivamente. Esta combinación de bandas se utilizó en la generación de los estereopares sintéticos, así como en el espaciomapa.

V.5.- Georreferenciación de la imagen Landsat TM

La georreferenciación se conoce también como corrección geométrica o rectificación de la imagen, que establece una relación entre un sistema de referencia cartográfica y la imagen, donde a cada celda le corresponde una posición en el sistema de referencia (Sabins, 1987; Josheph y David, 1976; Richards, 1986; Vincent, 1996). Para aplicar este procedimiento se requiere identificar rasgos, tanto en la imagen, como en algún sistema de referencia, que en este caso fueron las cartas topográficas del INEGI escala 1:50,000 que abarcan la zona de estudio y que fueron enlistadas en la sección 5.1. Con las coordenadas de los rasgos identificados en ambos sistemas, se construye una tabla de puntos de control terrestre (PCT) (ver anexo 3) con los que se calculan los parámetros para la transformación geométrica. Se identificaron 36 puntos de control en la imagen Landsat TM como se muestran en la figura 5. En la figura 6, se muestra la imagen completa en tonos de gris posterior a la transformación geométrica, especificando sus coordenadas en el sistema mundial de referencia (WRS2) y resaltando con una línea segmentada la zona de estudio.

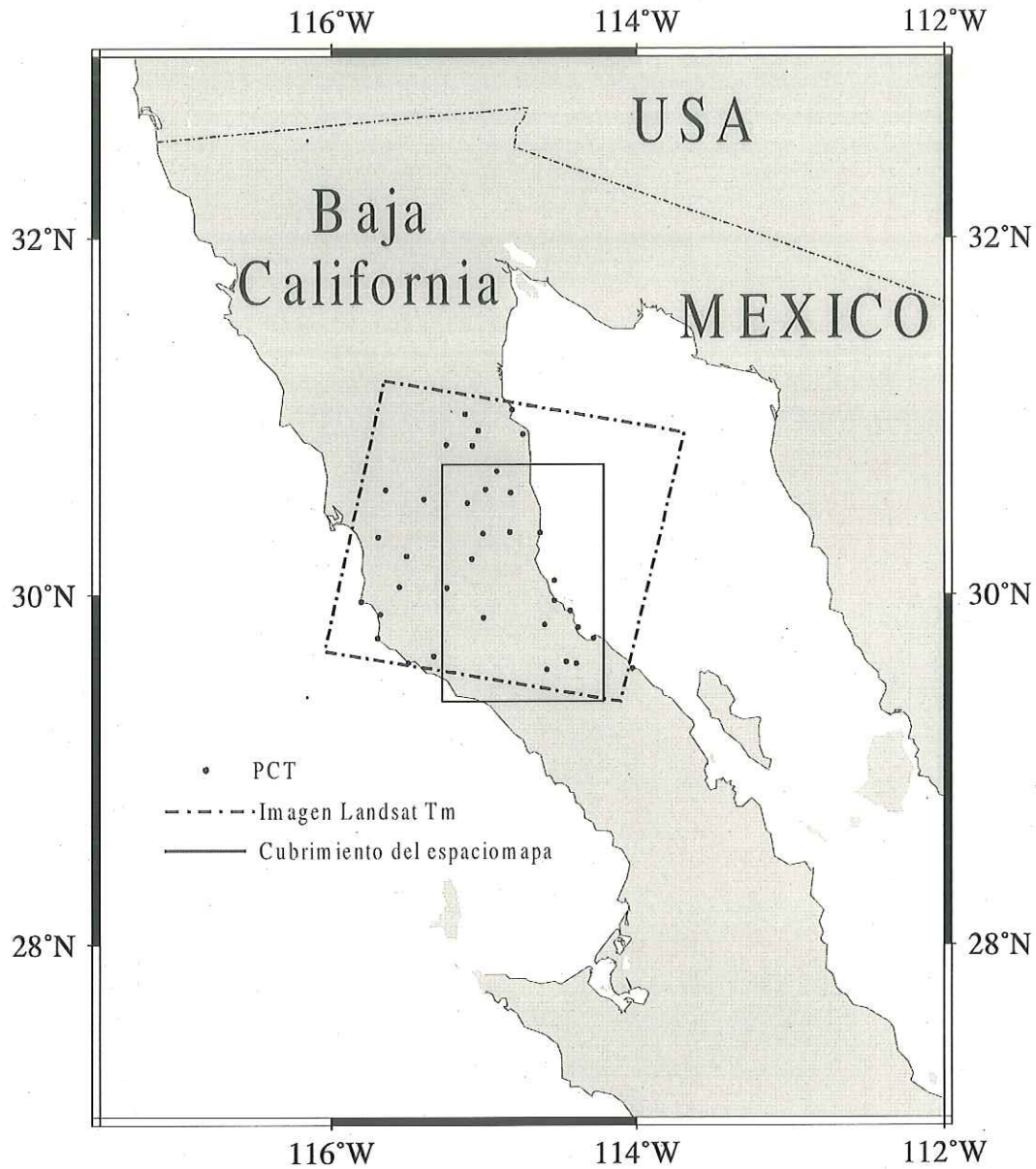


Figura 5. Cobertura geográfica de la imagen Landsat TM y del espaciomapa de la zona de estudio, mostrándose la ubicación de los puntos de control terrestre (PCT) utilizados en el proceso de georreferencia de la imagen.

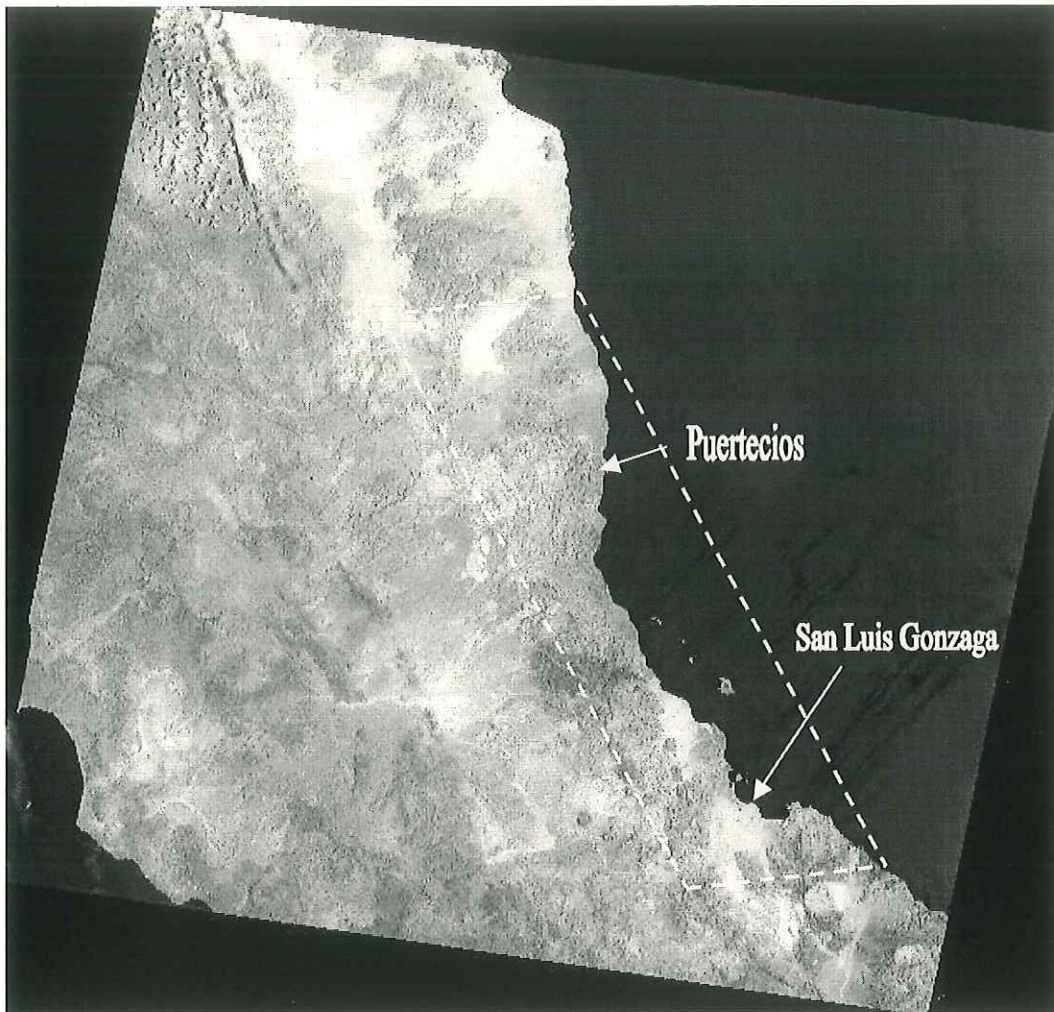


Figura 6. Imagen Landsat TM con coordenadas de pase 38 renglón 39 del sistema WRS2 tomada el 20/Julio/1987 donde se enmarca la franja costera entre Puertecitos y San Luis Gonzaga, Baja California.

V.6.- Generación de estereopares sintéticos

Es ampliamente aceptado que la interpretación geológica y geomorfológica de fotografías e imágenes estereoscópicas provee más información que el análisis monoscópico. Es común crear modelos estereoscópicos a partir de fotografías tomadas a un mismo objetivo con cierto grado de superposición desde dos puntos distintos.

Modelos estereoscópicos artificiales pueden ser creados a través del procesado por computadora de imágenes individuales, generando el par izquierdo y derecho. Las vistas izquierda y derecha son generadas al introducir un pequeño corrimiento a cada elemento de la imagen (pixel) como función de la elevación en cada punto y puede ser formulado con la siguiente ecuación:

$$\Delta p = \Delta h(k) \quad (1)$$

Donde Δp es el desplazamiento en el paralaje horizontal en cada una de las celdas, que es proporcional a la diferencia de altura de la celda con respecto a un valor de referencia Δh . La constante k determina el desplazamiento del paralaje en la visión estereoscópica y controla la exageración vertical de los objetos.

Este principio para generar estereopares sintéticos se conoce desde mediados de la década de los 70's (Batson *et al.*, 1976; Kowalik, 1993; Sabins, 1987), pero no es utilizado con frecuencia, tal vez porque se requiere de herramientas de cómputo especializadas.

Las imágenes estereoscópicas artificiales proveen nuevas perspectivas en la interpretación de patrones geológicos locales y regionales en comparación con el análisis monoscópico. La mejoría en el análisis es especialmente significativa en terrenos difíciles de interpretar por la densa cubierta vegetal o la ausencia de unidades geológicas contrastantes.

Entre las ventajas que presentan los modelos estereoscópicos sintéticos se puede mencionar que:

- Solo se necesita una imagen de satélite con su respectivo modelo de elevación.

- La exageración vertical puede ser ajustada al tipo de terreno o a la preferencia del intérprete.
- El interprete experimenta un mínimo en el forzamiento de la vista porque la sobreposición entre las imágenes es del 100 % y además el par izquierdo tiene los mismos colores y contrastes que el par derecho.
- Se pueden generar vistas sinópticas de grandes extensiones geográficas que proporcionan una perspectiva global, imposible de reproducir con fotografía aérea.

V.7.- Análisis geomorfológico

El análisis geomorfológico se realizó a través de la fotointerpretación de los 5 estereopares sintéticos que abarcan las 5 subcuencas hidrológicas propuestas por el INEGI para la región de estudio (figura 3). El límite norte se definió por la delimitación de la cuenca del Arroyo Matomí (región hidrológica RH4Aa). El límite Sur es la cuenca del Arroyo Santa María que constituye la región hidrológica RH5Cd. La parte Oeste se definió con el límite natural del parteaguas del escarpe del Golfo y al oriente con el Golfo de California.

La caracterización de unidades geomorfológicas se efectuó con criterios de clasificación tomados de López-Blanco (1994) y Yang *et al.* (1999). Estos criterios se enfocan a la delineación de unidades ambientales y geomorfológicas aplicando técnicas de PR y SIG, ajustándolos a la clasificación de Zinck (1989) quien establece la realización de los análisis que van de lo general hacia lo particular, llegando al análisis de subgrupos de

geoformas, donde su principal elemento de clasificación es el relieve, como lo describe la

Tabla I.

Para la categorización se tomó el sistema de clasificación de geoformas del relieve de Zinck (1989), conjugando elementos visuales hasta distinguir grandes unidades o tipos de relieve presentes en la superficie; cada geoforma se diferencia por sus dimensiones espaciales en conjugación con sus propiedades superficiales como desniveles, altitud y orientación del relieve. Para tipificar las geoformas en la franja costera PSLG se utilizaron las agrupaciones como se explica en la Tabla II y las unidades gráficamente son representadas en el espaciomapa.

Tabla I. Sistema de clasificación de geoformas, tomado de Zinck (1989).

NIVEL	CATEGORÍA	CONCEPTO GENÉRICO	PEQUEÑA DEFINICIÓN
6	Orden	Geoestructuras	Porciones continentales caracterizadas por las estructuras geológicas (ejemplo: cordillera, geosinclinal, escudos)
5	Suborden	Ambiente morfogenético	Aspectos biofísicos que son controlados por el estilo de neodinámicas internas y/o externas (ejemplo: estructural, deposicional, erosional)
4	Grupo	Paisaje	Caracterización de la tierra por la repetición de tipos de relieves, por asociación o discrepancias en tipos de relieve (ejemplo: valle, plateau, montaña)
3	Subgrupos	Relieve/modelos	Relieves que son determinados por la combinación de las estructuras topográficas (ejemplo: cuesta)
2	Familia	Litología/facies	Naturaleza petrográfica de rocas consolidadas (ejemplo: gneiss, limonitas, etc.) o origen/naturaleza de las formaciones no consolidadas (ejemplo: periglacial, lacustre, aluvial, etc.)
1	Subfamilias	Geoforma	Básicamente en tipo de geoforma, caracterizadas por una combinación de geometrías, dinámica ó historia geológica

Tabla II. Clasificación sinóptica de geoformas

Provincia Fisiográfica	Estructura Geológica	Relieve	Unidad
Península de B.C. *	Cordilleras	Laderas	Laderas Bajas
			Lomeríos
			Lomeríos intramontañas
		Mesetas	Mesetas
		Serranías	Sierra Alta
			Sierra Media
			Sierra Baja
		Valles	Cañón intramontaña
			Valle Intramontaña
			Valle aluvial
		Cuerpos volcánicos	Volcán
	Cuencas sedimentarias	Planicies	Planicies
			Aluvión **
			Playas **
			Cauces **
		Terrazas	Terrazas aluviales

Nota: * de acuerdo con Gastil et al (1975). Las unidades marcadas con el símbolo ** se agruparon en la clase planicie en el espaciomapa, por razones de unificación de criterios con base en el relieve.

V.8.- Análisis de pendientes y aspecto del terreno

Unos de los productos obtenidos del procesado del MDT son los valores de la pendiente y orientación de la pendiente, también conocido como el aspecto del terreno. Las pendientes se calculan con el objeto de analizar el comportamiento de la superficie con un enfoque geomorfológico. Bajo el esquema metodológico de Demek (1972), las pendientes sirven como criterios para la construcción, asignándoles a rangos específicos atributos

como pendientes ligeras, inclinadas ó escarpadas, que son aplicados en la evaluación del uso de suelo (anexo 4).

Para estimar la pendiente y el aspecto del terreno, se aplicó el método de Dozier y Strahler (1983), quienes proponen la siguiente fórmula:

$$\tan(pendiente) = \sqrt{(\delta z / \delta x)^2 + (\delta z / \delta y)^2} \quad (2)$$

$$\tan(aspecto) = \frac{\delta z / \delta x}{\delta z / \delta y} \quad (3)$$

donde $\delta z / \delta x$ y $\delta z / \delta y$ son las derivadas parciales de la altura en las direcciones Oriente-Poniente y Norte-Sur respectivamente. Horn (1981) desarrolló un método numérico para estimar las derivadas que se puede formular como:

$$\begin{aligned} [\delta z / \delta x]_{y,x} &= (z_{y-1,x-1} + 2z_{y,x-1} + z_{y+1,x-1} - z_{y-1,x+1} - 2z_{y,x+1} - z_{y+1,x+1}) / 8\Delta x \\ [\delta z / \delta y]_{y,x} &= (z_{y-1,x-1} + 2z_{y-1,x} + z_{y-1,x+1} - z_{y+1,x-1} - 2z_{y+1,x} - z_{y+1,x+1}) / 8\Delta y \end{aligned} \quad (4)$$

donde $z_{y,x}$ es el valor de la altura en el MDT en el renglón y y la columna x , Δx es la dimensión de la celda en la dirección Este-Oeste (columna) y, Δy es la dimensión de la celda en la dirección Norte-Sur (renglón).

Este método puede implantarse a través de la convolución de la matriz del MDT con matrices de coeficientes direccionales:

$$\delta_z/\delta_x = \frac{\begin{matrix} 1 & 0 & -1 \\ 2 & 0 & -2 \\ 1 & 0 & -1 \end{matrix}}{8\Delta x} \quad \delta_z/\delta_y = \frac{\begin{matrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{matrix}}{8\Delta y} \quad (5)$$

Este esquema genera rejillas regulares o raster, que almacenan la distribución espacial del aspecto y la pendiente para el análisis geomorfológico.

V.9.- Hidrología superficial y delimitación de cuencas

El modelado hidrológico es una de las aplicaciones más usuales de los sistemas de información geográfica, tales como Arc/Info, GRASS, IDRISI y otros más. Estas herramientas computacionales operan sobre los MDT delineando cuencas, y las redes hidrológicas superficiales y evaluando atributos de variables espaciales como el área de cuencas y la longitud de arroyos (López Blanco, 1994; Ehlschlaeger, 1989, 1991).

HEC-PREPRO (Hydrologic Engineering Center- PREPROcessor), el primer método aplicado, es un programa en lenguaje AML (Arc Macro Language) que extrae información topográfica e hidrológica a través de módulos del subsistema de rejillas (GRID) del paquete computacional ARC/INFO. AML es el lenguaje de automatización de guiones de ejecución propios del paquete ARC/INFO. Detalles de HEC-PREPRO pueden ser consultados en Hellweger (1997).

HEC-PREPRO realiza dos procesos, el primero es un pre-procesamiento que define las cuencas hidrológicas a partir de parámetros que establece el usuario, como el área mínima para considerarse una cuenca y la longitud mínima de los arroyos. La segunda parte calcula la pendiente del terreno, el trazo de arroyos, dirección de flujo y zonas de acumulación.

La información que se obtiene con el trazo de flujos describe la dirección de los escurrimientos en la superficie del modelo, evaluando cual es la zona de menor costo de desplazamiento del agua. La característica esencial de este proceso es que la información evaluada para cada celda es analizada en 3 celdas aledañas, codificando la trayectoria del escurrimiento con 8 valores. Se codifica de la siguiente manera: E = 1, SE = 2, S = 4, SW = 8, W = 16, NW = 32, N = 64, NE = 128 (figura 7).

Con las direcciones de flujo y las trayectorias, se contabilizan las celdas que aportan en la formación de un escurrimiento, almacenando el resultado en una rejilla o raster de acumulación. Cada celda almacena la suma de celdas aguas arriba que contribuyeron para la formación del arroyo. En este paso también se genera la red hidrológica en formato vectorial.

El segundo método es el desarrollado por Ehlschlaeger (1989) y constituye uno de los módulos del sistema de información geográfica GRASS (GRASS, 1999). Este programa genera información similar al método anterior, (red hídrica, acumulación, dirección de flujo, depresiones) con diferencias en el algoritmo aplicado y en la forma de codificar los resultados. Utiliza el algoritmo de búsqueda A^T (Ehlschlaeger, 1989), conocido como de mínimo costo, para organizar los datos de elevación y evaluar la red hidrológica. Busca la

trayectoria menos costosa entre un punto de inicio y un destino, evaluando los costos según la pendiente que atraviesa el flujo a través de las celdas. Este método codifica los resultados utilizando el modelo de datos de rejilla, a diferencia de HEC-PREPRO que los almacena con el modelo de vectores. En la figura 7 se muestra el esquema utilizado para el cálculo de dirección de flujo y acumulación en ambos métodos.

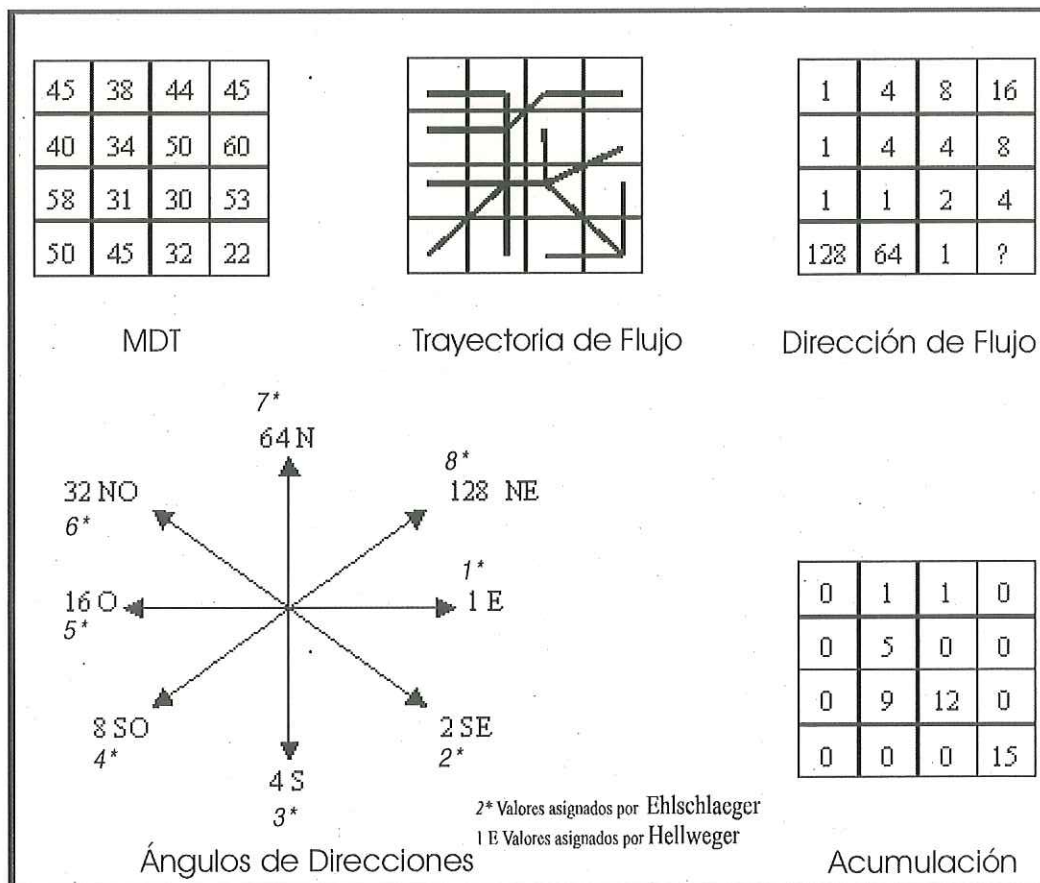


Figura 7. Descripción gráfica de los cálculos efectuados por los métodos propuestos por Hellweger (1997) y Ehlschlaeger (1989), y la diferencia en la codificación en la dirección del flujo.

V.10.- Clasificación de arroyos

Para la clasificación de los arroyos se utilizó el método propuesto por Horton (1932) y Strahler (1964), que consiste en asignar un orden de importancia a los arroyos de cada cuenca, dependiendo de su orden jerárquico en la red hidrológica superficial. La red está integrada por un cauce principal y una serie de tributarios cuyas ramificaciones se extienden desde las partes más altas hacia las partes más bajas donde convergen los escurrimientos a través de los canales (Sanjuame y Villanueva, 1996; Llamas, 1989). Se calculó el área correspondiente a cada cuenca del MDT y se aplicó un análisis hidrológico con ayuda del paquete Rivertools versión 2.0 que utiliza el método antes mencionado.

El orden de los arroyos se define de la siguiente forma: cuando un tributario se localiza en las partes superiores de la cuenca y no recibe ningún aporte de otro canal por pequeño que sea, se le asigna el primer orden; en el caso en que un canal recibe aportes de dos tributarios de orden uno en cualquier parte del canal, pasa a ser un canal de segundo orden y así sucesivamente como se puede apreciar en la figura 8.

En el caso específico de la clasificación del Horton-Strahler no existe ningún parámetro que defina el orden de una cuenca, por lo que, según el orden máximo del cauce principal definirá el orden de la cuenca.

Además de aplicar el modelo de Horton-Strahler, Rivertools calcula una serie de parámetros hidrológicos que nos permiten caracterizar las cuencas. Entre estos parámetros está la densidad de drenaje, el rango de alturas y el número total de afluentes, además de generar representaciones gráficas de los órdenes de los arroyos.

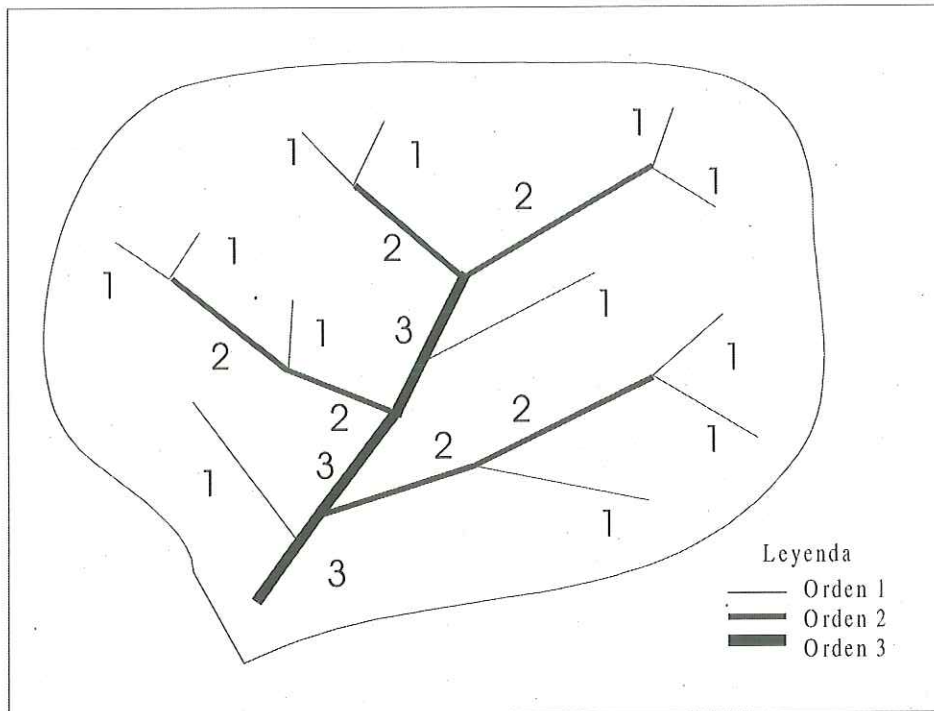


Figura 8. Clasificación de arroyos con el esquema de Horton-Strahler

VI RESULTADOS

VI.1.- Análisis geomorfológico a través de estereopares

Para este trabajo se generaron 6 estereopares sintéticos cuya extensión geográfica se indica en la figura 9. Estos fueron impresos a color en hojas tamaño carta. Se generó un estereopar cubriendo la zona de estudio a escala aproximada a 1:640,000 y los 5 restantes variaron sus coberturas, extendiendo sus límites de acuerdo a las subcuencas definidas por el INEGI (1985) y que están indicadas en la figura 3.

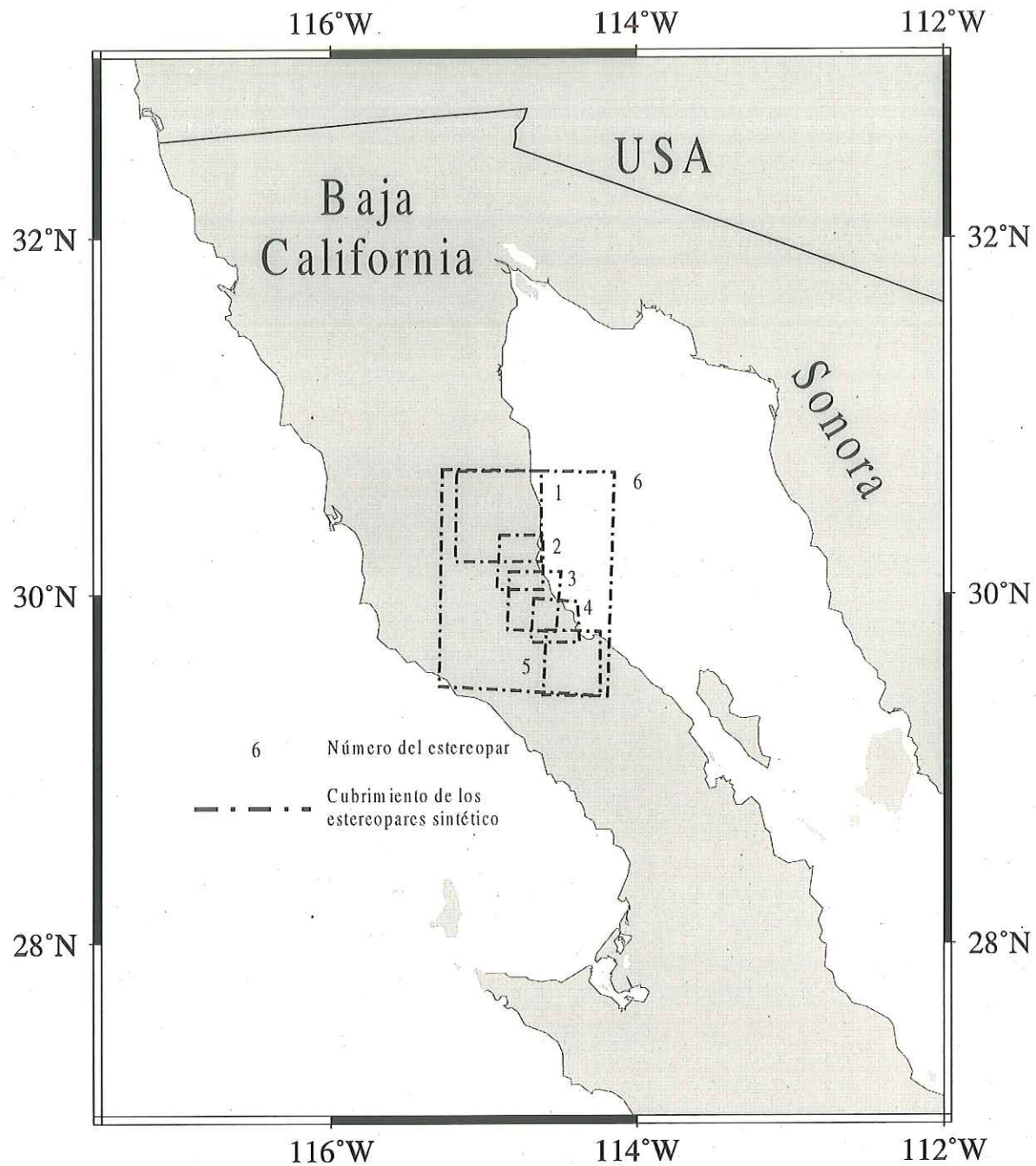


Figura 9. Extensión geográfica de los estereopares sintéticos generados.

Como se mencionó en la sección 5.7 de la metodología, el parámetro k de la fórmula 1, es un coeficiente que controla la exageración vertical y que se establece al

generar los estereopares, ajustándose a las características del relieve y a la preferencia del intérprete. Se estableció un valor común de 0.25 para k en los 6 estereopares. Los archivos gráficos se prepararon para ser impresos a color con una resolución de 400 puntos por pulgada y se almacenaron con formato TIF. Los nombres de éstos se asignaron de acuerdo al nombre del arroyo principal de cada cuenca y se añadió el sufijo *i* y *d* para el estereopar izquierdo y derecho respectivamente como se indica en la Tabla III.

Tabla III. Relación entre el número del estereopar, nombre de la cuenca con su clasificación de INEGI, escala del estereopar y nombre de los archivos gráficos que los almacenan.

No.	Estereopar (regionalización de INEGI)	Escala	Archivos gráficos
1	Matomí (Rh4A,a)	1:290,000	matomi-i.tif matomí-d.tif
2	Los Hemes (Rh4A,b)	1:165,000	hemes-i.tif hemes-d.tif
3	Zamora (Rh4A,c)	1:170,000	zamora-i.tif zamora-d.tif
4	Alfredo (Rh5C,d)	1:160,000	alfredo-i.tif alfredo-d.tif
5	Santa Maria (Rh5C,c)	1:210,000	maría-i.tif maría-d.tif
6	General	1:640,000	general-i.tif general-d.tif

La impresión a color de los 6 estereopares así como la impresión en acetato de la interpretación geomorfológica de tres de ellos (estereopares 1, 3 y 5), se incluyen en el anexo cartográfico. El análisis geomorfológico se realizó a través de la fotointerpretación de los estereopares según las características del relieve definidas en la Tabla II, agrupándose en 13 unidades geomorfológicas. Las características del relieve de cada geoforma se presentan en la Tabla IV.

Tabla IV. Criterios visuales para la clasificación de geoformas.

Sistema de Toponimias	Geoformas asociadas	Altura m.	Pendientes
Cañón intramontaña	Sierras y lomeríos	varían	Abruptas y convexas
Laderas bajas	Lomeríos, bajadas y cañadas	500-1600	Suaves, con pendientes abruptas en las cañadas
Lomerío	Lomeríos y planicies	100-500	Suaves
Lomerío intramontaña	Lomeríos, entre sierras	varían	Suaves convexas
Mesetas	Mesetas bajas y lomeríos	500-1800	Levemente onduladas
Planicie	Planicies aluviales y lomeríos	50-100	Suaves
Sierra alta	Sierra alta y mesetas	> 1000	Abruptas
Sierra baja	Sierra baja, mesetas y llanuras	300-500	Suaves hasta abruptas
Sierra media	Sierra alta y mesetas	500-1000	Abruptas
Terrazas aluviales	Lomeríos, planicies		Planas
Valle aluvial	Sierras y lomeríos	110	Planas y suaves
Valle intramesetas	Meseta, lomeríos, planicies	650	Verticalmente convexas a las cañadas
Volcán		varían	Abruptos y cóncavos

En la parte norte del estereopar Matomí(1), se presenta un complejo de sierras bajas y depresiones que forman parte de la provincia extensional del Golfo. Al N se ubica la sierra de San Felipe constituida de rocas graníticas y metamórficas del Mesozoico (Gastil, 1975). Estas unidades litológicas presentan coloración grisácea y púrpura, respectivamente. Al NE del estereopar 1 se localiza un grupo de pendientes suaves formando una unidad de laderas bajas a lo largo del escarpe principal del Golfo, disminuyendo sus pendientes hasta

llegar a Valle Chico. Estas geoformas se pueden apreciar en coloraciones verdes y naranjas constituidas por rocas volcánicas.

La Sierra de San Fermín se ubica al NE del estereopar Matomí(1), entre los Llanos de San Fermín y las planicies costeras, se distingue con coloraciones verdes (rocas volcánicas), grises (rocas metamórficas) y coloraciones naranjas (roca volcánica), clasificándole por su relieve como sierra baja. Las pendientes en la sierra de San Fermín son escabrosas en la parte central, suavizándose hacia las periferias, en el valle aluvial de los llanos de San Fermín y en las planicies del arroyo Matomí hacia la costa.

Las planicies se presentan a lo largo de la línea de costa, desde San Felipe hasta Puertecitos. Estas planicies costeras se interrumpen al sur de Puertecitos por las mesetas que llegan hasta la costa y producen una zona de litoral rocoso y escarpado. Un pequeño segmento de planicie aparece bordeando el Volcán Prieto, surgiendo nuevamente hacia el sur en los abanicos aluviales de El Huerfanito, desde San Judas hasta punta Bufe y finalmente en las planicies de San Luis Gonzaga. Las coloraciones de las planicies en los estereopares reflejan los materiales de las rocas que los formaron. Al norte, las tonalidades varían de tonos verdes-grisáceos para los aluviones de origen volcánico-metamórfico y al sur tonos blanco-amarillentos para rocas granítica. En El Huerfanito, presentan colores grises aquellos aluviones que provienen de rocas volcánicas y un color gris oscuro para los sedimentos del complejo metamórfico en las sierras altas adyacentes. Se presentan tonos claros a partir de San Judas hasta las planicies de San Luis Gonzaga donde el sedimento proviene de las sierras de composición granítica. La figura 10 es una vista del relieve en la parte norte

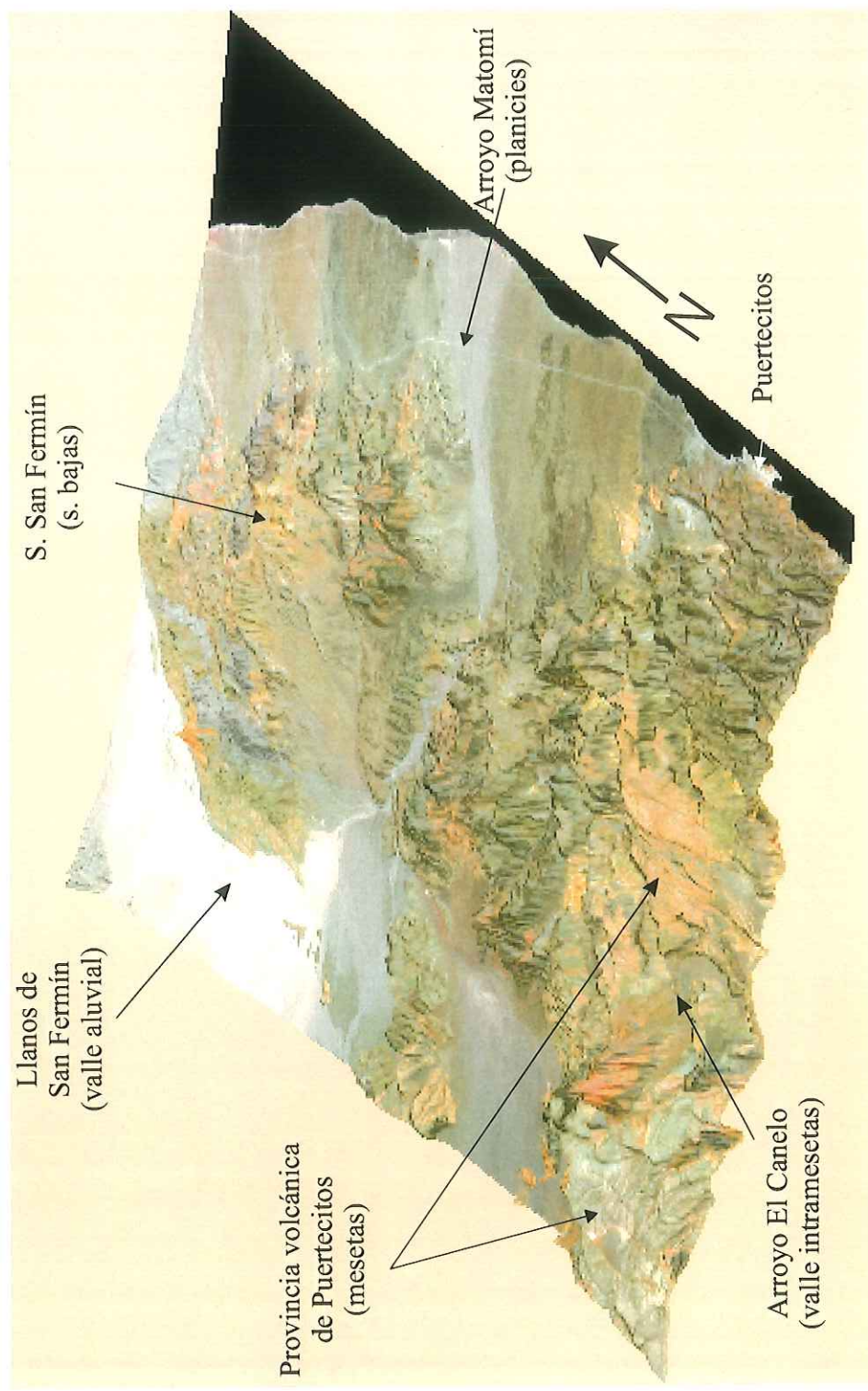


Figura 10. Vista en perspectiva donde se muestran las planicies, sierras bajas, mesetas, valles intramesetas, y valles aluviales al norte de la zona de estudio. Se aprecia el abanico aluvial del arroyo Matomí que desemboca al Golfo de California y la localidad de Puertecitos. Al N se puede distinguir la Sierra de San Fermín y al NE los llanos de San Fermín

de la zona de estudio, generada a partir de una vista en perspectiva del MDT desde el SE y texturizado con un compuesto en falso color con las bandas 5, 4 y 2 de la imagen Landsat TM a los colores primarios rojo verde y azul, respectivamente. Esta combinación es la misma a la utilizada en los estereopares y en el espaciomapa. En esta figura se percibe la sierra y llanos de San Fermín, la planicie del arroyo Matomí y la parte Norte de la PVP con el valle intrameseta enclavado entre las mesetas.

Entre la sierra de San Felipe y la sierra de San Fermín, se encuentra el valle aluvial conocido como llanos de San Fermín. Está constituido por pendientes suaves y planas, distinguiéndose con coloraciones claras al norte para los sedimentos derivados de rocas graníticas y con coloraciones grises al sur para los provenientes de rocas volcánicas.

Entre la sierra de San Felipe y el escarpe del Golfo, se encuentra el valle Chico, con pendientes suaves, presentando coloración clara por el origen granítico del sedimento proveniente del batolito y su cauce principal, el arroyo Parral, desemboca hacia el norte fuera de la zona de estudio. Otra unidad de valle aluvial se localiza en la zona sur en las planicies de SLG, esta unidad solamente se puede ubicar en el estereopar general (6) y en el Santa María (5). Esta unidad presenta tonos grisáceos oscuros y tonalidades claras, como consecuencia del aporte de sedimentos de la sierra de Calamajué, compuesta de rocas metamórficas, ubicadas en el extremo SE del estereopar 5. Las unidades de planicies y valles aluviales son consideradas por Gastil *et al.* (1975) como depósitos jóvenes del Cuaternario.

En la región al sur del arroyo Matomí cambian las geoformas, de sierras y planicies, a una región de rocas volcánicas del Terciario que forman mesetas. Las rocas volcánicas

forman la provincia volcánica de Puertecitos (PVP) o plateau Matomí que ha sido estudiada por Martín-Barajas y Stock (1993), Martín-Barajas *et al.* (1995), y por Nagy *et al.* (1999). Las mesetas se perciben desde el arroyo Matomí al norte hasta el abanico aluvial del Huerfanito al sur. Además, están limitadas por el escarpe principal del golfo. Estas unidades fueron clasificadas como mesetas por su baja o casi nula pendiente y están compuestas por una serie de bloques basculados con orientación predominante hacia el este producidas por fallas normales y disectadas por los arroyos El Canelo y Los Hemes.

Se observan dos grandes grupos que están separados por el cauce del arroyo Los Hemes. El primer grupo se localiza en la parte central del estereopar Matomí(1), con coloraciones naranjas y verde-amarillas, colindando al este con la sierra de Santa Isabel, y presentando mesetas de poca pendiente y de gran extensión, disectada únicamente por las cañadas aguas arriba del arroyo El Canelo.

El segundo grupo de mesetas está conformado por una serie de bloques separados entre sí por cañadas definidas por fallas normales con una orientación N-NW. Estas mesetas tienen mayor pendiente y variación en su orientación. En el estereopar 1 la mayor parte de los bloques presentan coloraciones verdes y se identifica una pequeña zona de mesetas con tonalidades amarillas al N del volcán Prieto. La figura 11, generada de manera similar a la 10, abarca la parte media de la zona de estudio que incluye la PVP donde se aprecian las mesetas basculadas y su orientación bordeando al Volcán Prieto que a su vez es rodeado por planicies. También se puede observar el picacho Canelo, la parte norte de la sierra de Santa Isabel y el abanico aluvial del Huerfanito.

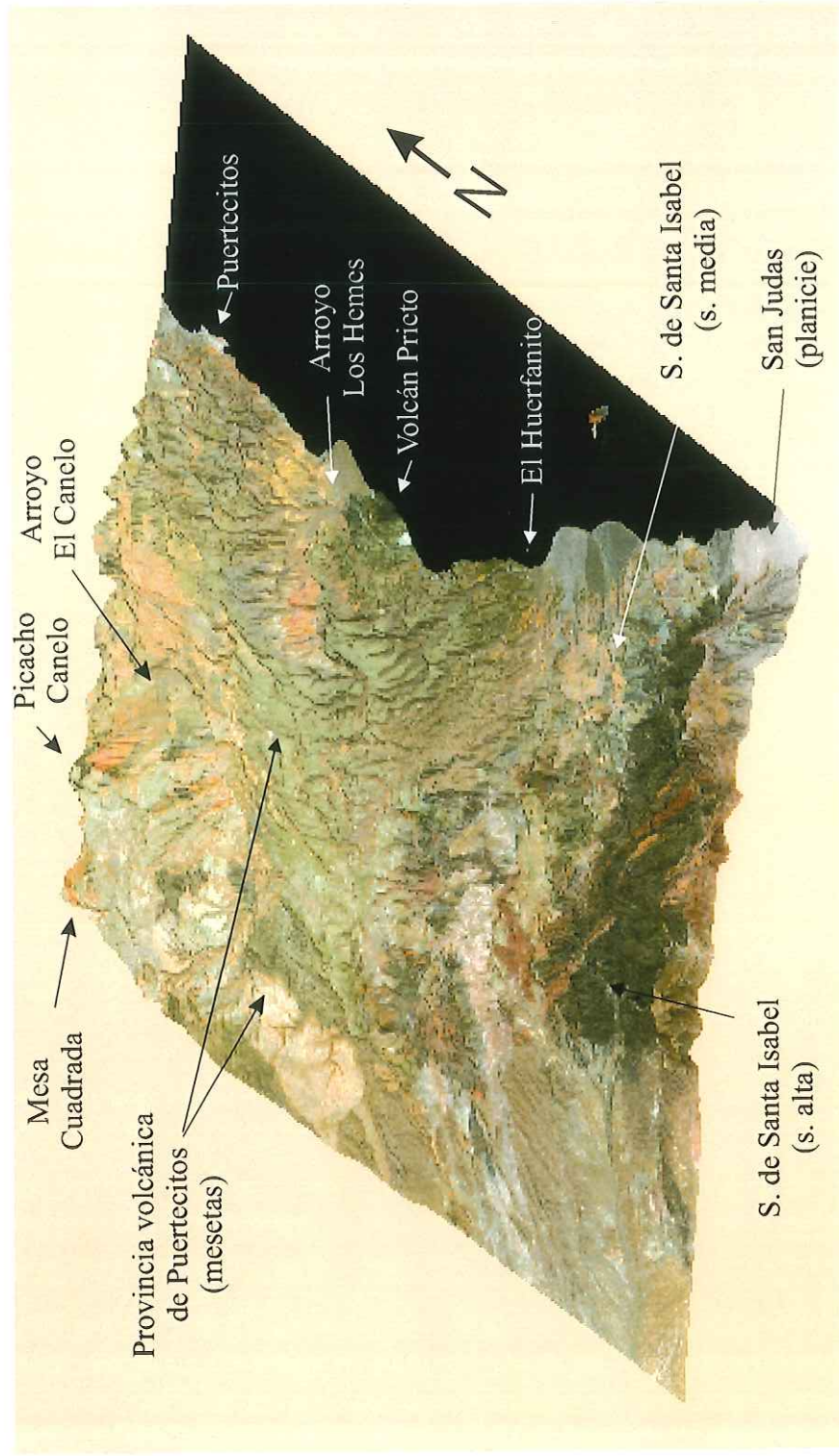


Figura 11. Vista en perspectivas, identificándose las unidades de mesetas(Matomí), Volcán (Prieto), Sierra alta y media (sierra Santa Isabel), planicies (el Huerfanito, San Judas).

Además de los dos grandes bloques de mesetas descritos anteriormente, estas geoformas se localizan en parches aislados en la zona de estudio. La primera se localiza en la parte sur de la sierra de San Felipe, con coloraciones amarillas que se pueden apreciar en el estereopar Matomí (1). Otra unidad se localiza en la parte central W del estereopar Zamora (3), conocida como mesa Huatamonte, con tonalidades verde olivo, contrastando con los grises oscuros de las laderas bajas y naranjas de los lomeríos. Por último, en la sierra Calamajué, se puede apreciar otra unidad en la parte sur del estereopar Santa María (5), con coloraciones verdes, rodeada de laderas bajas con tonalidades grises.

Los dos grandes bloques de mesetas en la parte N de la zona de estudio son disectados por las cañadas de los arroyos donde se desarrollan valles a lo largo del cauce principal. Los dos arroyos de mayor longitud son Los Hemes y El Canelo, este último produce la formación de un valle ancho en las cercanías del Picacho Canelo, situado en medio de las mesetas. Este rasgo geomorfológico, definido como valle intrameseta, se aprecia en el primer estereopar por una coloración grisácea, sobresaliendo entre las coloraciones naranja-amarillentas de las mesetas. Las pendientes en las paredes de los valles son muy escarpadas ya que las mesetas alcanzan alturas de 50 a 100 m, cambiando a pendientes suaves en el valle. La dimensión de este valle no es muy extensa, ya que su longitud alcanza aproximadamente los 10 km de largo por 2.5 km de ancho, siendo la única unidad en esta clase y se presenta en la figura 10.

Al sur de la zona de mesetas, se encuentra la sierra de Santa Isabel con sus pendientes abruptas, que corresponden a un cambio en la litología, ya que existe un contacto de norte a sur entre rocas volcánicas, metamórficas y rocas ígneas intrusivas. Este

contraste se puede apreciar en el estereopar general que cubre toda la zona de estudio. En esta sierra podemos encontrar los tres tipos de geoformas, las sierras altas, medias y bajas.

En el estereopar Alfredo (4), se pueden apreciar las sierras bajas que se localizan en los alrededores de las planicies costeras de punta Bufe, con tonalidades que varían entre verdes en las rocas volcánicas, tonos grises en las rocas ígneas intrusivas y colores violeta en las rocas metamórficas. En el estereopar Zamora (3), se presentan dos sierras con diferentes características en el relieve, en la parte norte se localizan las sierras altas con tonalidades verde oscuras, marrón y ocre constituida por rocas metamórficas, y al sur las sierras medias con tonalidades verde-grisáceas compuesta de rocas graníticas.

En la parte NW del estereopar Santa María (5), en el extremo sur de la sierra de Santa Isabel, se interpretó otra unidad con características de sierra baja, compuesta de rocas volcánicas. Presenta una estructura disectada diagonalmente en la parte media por el cauce del arroyo Alfredo. Su coloración es verde-grisácea, con algunas zonas amarillas y rojizas. Por último se presenta otra unidad de sierras bajas en la sierra La Josefina, que se puede observar en la parte central del mismo estereopar. La composición litológica de estas unidades cambia, ya que, las tonalidades verde-moradas corresponden a las rocas metamórficas y las grisáceas a las ígneas intrusivas. Las sierras bajas se pueden apreciar en las vistas en perspectiva de las figuras 10 y 12. La figura 12 generada de manera similar a las figuras 10 y 11, abarca la parte sur de la zona de estudio donde se percibe la parte más al sur de la sierra de Santa Isabel, sierras Calamajué y San Francisquito, el cerro Aguatosa también conocido como el Potrero, las planicies al norte de Punta Bufe y las de SLG.

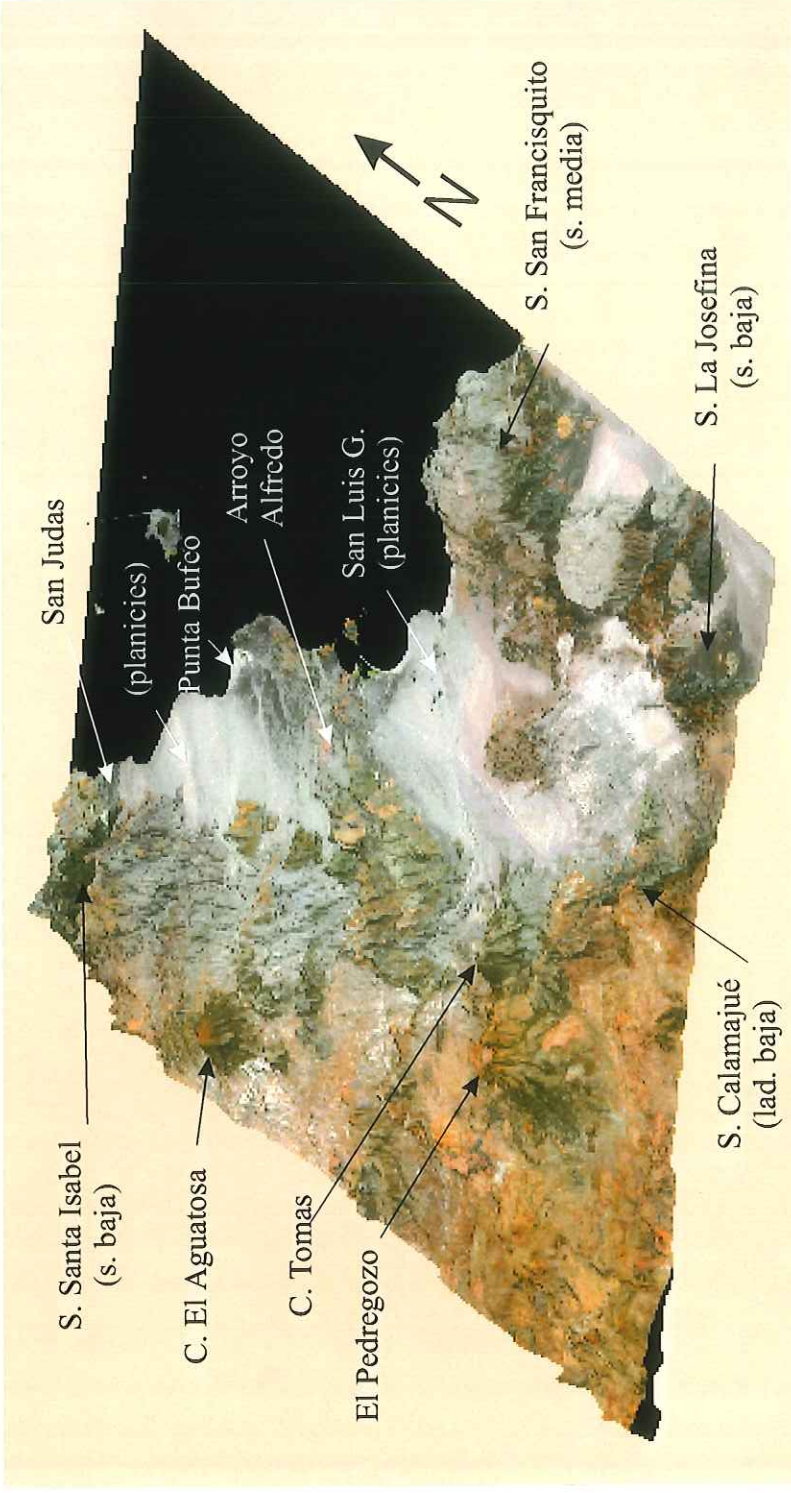


Figura 12. Vista en perspectiva de las geoformas al sur de la zona de estudio, presentándose las planicies al norte de Punta Bufco, San Luis Gonzaga, constituidas de sedimentos de rocas graníticas y volcánicas, provenientes de la S. Santa Isabel, así como los cuerpos volcánicos en la parte norte de la S. Calamajué

Las superficies clasificadas como sierra media, se ubican al sur de las mesetas, en la sierra Santa Isabel y presentan pendientes escarpadas. Estas geoformas se pueden apreciar en los estereopares Matomí (1), Hemes (2) y Zamora (3). La coloración de estas geoformas coincide con los colores de la sierra de San Felipe, con tonalidades verde-grisáceas en la mayor parte, además de presentar un grupo de rocas con coloraciones violeta en el centro. Estas estructuras se localizan al W de la planicie costera de Huerfanito, donde sobresale la orientación E-W de los arroyos.

Otra unidad de sierra media se localiza al sur de la anterior, estando en continuidad de la sierra alta de tonalidades verde-azuladas y el cañón intramontaña. La coloración de la sierra media es en tonos verdes-grisáceos, caracterizándose con tonos rojizos y naranjas en la parte central de la unidad. El relieve no conserva ningún patrón específico, solamente sus pendientes escarpadas. Este mismo tipo de geoformas se localiza en la parte W de las planicies costeras de Punta Bufeo, apreciándose en los estereopares Zamora (3) y Alfredo (4) con coloraciones verdes-grisáceas de las rocas ígneas intrusivas, un pequeño manchón de rocas violetas y naranjas. El relieve en esta unidad se destaca por la alineación de sus estructuras, con un patrón N-S y NW-SE. La última unidad de sierra media, se presenta en la sierra San Francisquito en Punta Final, su litología aparece en color verde-grisáceo por las rocas ígneas intrusivas, tonalidades violetas de las rocas metamórficas y pequeñas manchas color claro que se pueden apreciar solamente en la parte NE del estereopar Santa María (5). Esta unidad presenta un relieve escarpado y rugoso, apreciándose un patrón N-S de alineamiento en las estructuras.

Las sierras altas se presentan en la parte media de la sierra de Santa Isabel en el estereopar Zamora (3), resaltando por sus tonalidades oscuras verde-azuladas y en la parte intermedia dos franjas con tonalidades ocre a naranjas, esta unidad se compone de rocas metamórficas del paleozoico (Gastil, 1975). El relieve que presenta esta unidad es con pendientes escabrosas con mucha rugosidad. Otra unidad se localiza en la sierra Calamajué y esta constituida de rocas volcánicas con relieves menos rugosos, donde sobresalen los cerros de Tomás y el Pedregoso, con alturas de 1180 y 1440 m, respectivamente. Estas sierras presentan tonalidades verdes-grisáceas con coloraciones naranjas en sus cimas. Ambas unidades se pueden apreciar en el estereopar Santa María y en la vista en perspectiva de la figura 12.

La geoforma clasificada como volcán presenta coloraciones verdes-oscuras, esta unidad es conocida como Volcán Prieto y se localiza en la línea de costa bordeado por la unidad de mesetas. Se puede apreciar en los estereopares Matomí (1) y Los Hemes (2), así como en la vista en perspectiva de la figura 11. En la parte media derecha del estereopar Zamora (3), se localiza otra geoforma con las características de un cuerpo volcánico, conocida con los nombres de cerro Potrero o La Alguatosa; presentando tonalidades verdes-oscuras y rojiza en el centro, circundada por las coloraciones verdes-grisáceas de la sierra media al este, y coloraciones claras naranjas de los lomeríos al oeste. Otra unidad está localizada en la Isla San Luis, que se presenta con estructura volcánica. Esta unidad solamente se puede apreciar en el estereopar Alfredo y en el general, sus tonalidades son grisáceas, destacando en las partes más altas con coloraciones verdes-oscuras.

Las geoformas clasificadas como lomeríos se localizan en la parte W la sierra Santa Isabel y la sierra Calamajué. En la parte aledaña a la sierra Santa Isabel son tonos claros-naranjas con algunas tonalidades en verde-rojizo, que se pueden apreciar al W del estereopar Santa María (5); el relieve de estos lomeríos está compuesto de pequeñas ondulaciones en la superficie con pendientes suaves. En la parte sur, al W de la sierra Calamajué las tonalidades cambian a tonos naranja-rojizo, con pendientes más pronunciadas, debido a la presencia de domos volcánicos con respecto a los lomeríos situados más al norte. Se presenta otra unidad de lomeríos hacia el W de la planicie costera de San Luis Gonzaga, en la parte media entre la sierra de La Josefina y Calamajué, con tonalidades grisáceas y claras, con presencia de rocas ígneas intrusivas y sedimentos. Los lomeríos se pueden apreciar en la figura 12.

La única unidad clasificada como lomerío intramontaña, se localiza en la parte central del estereopar Zamora (3), encontrándose en la parte intermedia entre las mesetas de coloración verde-oscuro y la sierra baja con coloraciones naranjas-verdosa, su coloración es naranja al igual que la sierra, diferenciándose solamente por su relieve y pendientes más suaves.

La última geoforma son las terrazas aluviales, que se localizan en las planicies costeras de SLG. Estas terrazas se pueden observar en el estereopar Santa María (5), colindando con la sierra baja del arroyo Alfredo. Su tonalidad es grisácea por el origen principalmente volcánico de sus sedimentos. Esta geoforma también sobresale de la planicie por estar disectada por arroyos, causando la formación de pequeñas cañadas.

La extensión territorial para cada geoforma se presenta en la tabla V, sobresaliendo la unidad de mesetas con el 26% del área, seguido por el complejo sierras medias con el 17.9% y las sierras bajas ocupan el tercer lugar con el 15.1%. El conjunto de planicies, valles aluviales, valle intramesetas y terrazas aluviales, suman un área de 754 km² que representa el 21.4% del total. Las restantes 6 unidades, cubren un área de 685 km² que representa el 19.4%. La distribución espacial de las geoformas fotoidentificadas en la zona de estudio, se representa en la figura 13 diferenciando cada unidad por distintos achurados.

Tabla V. Resultados de áreas y perímetros de cada geoforma en el área de estudio.

No.	Unidades	Área (km ²)	Perímetro (m)	Porcentaje
1	Cañón intramontañas	10	19,664	0.3
2	Laderas bajas	235	219,999	6.7
3	Lomerío	2.4	199,386	5.8
4	Lomerío intramontaña	7	18,660	0.2
5	Mesetas	924	501,976	26.2
6	Planicie	429	404,432	12.2
7	Sierra alta	204	102,851	5.8
8	Sierra baja	532	474,662	15.1
9	Sierra media	630	338,331	17.9
10	Terrazas aluviales	24	24,646	0.7
11	Valle aluvial	292	291,371	8.3
12	Valle intramesetas	9	26,746	0.3
13	Volcán	24	44,104	0.7

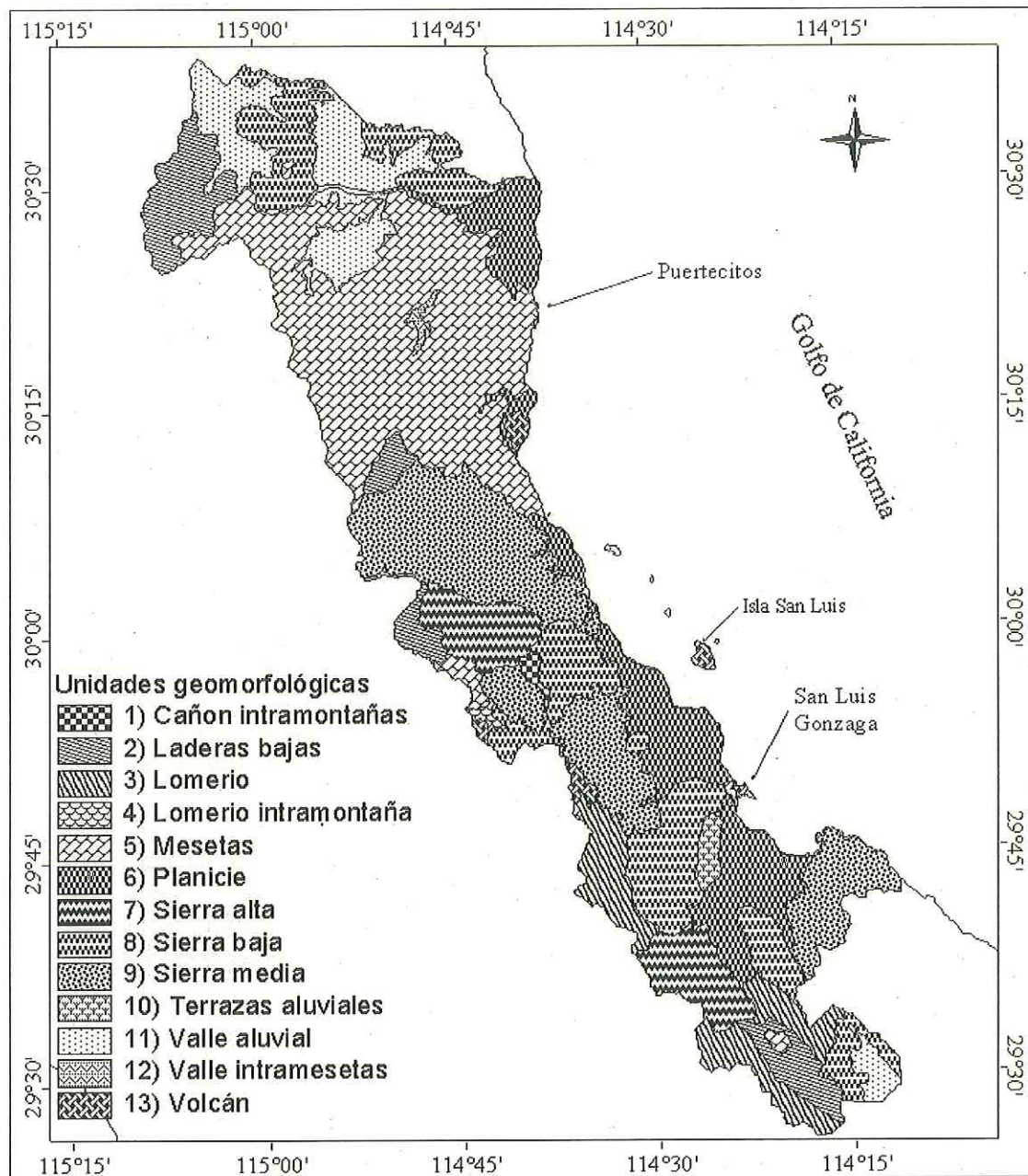


Figura 13. Unidades geomorfológicas en la franja costera entre Puertecitos y San Luis Gonzaga fotoidentificadas a partir de estereopares sintéticos.

VI.2.- Análisis de pendientes del terreno

Para analizar la distribución espacial de la pendiente, se aplicó la metodología descrita en la sección 5.9 con ayuda de las herramientas del SIG GRASS, en particular, con el programa *r.slope.aspect* que calcula la pendiente y la orientación de la pendiente de un MDT con las formulas descritas en esta sección. La distribución espacial de las pendientes se puede apreciar en la figura 14, donde las pendientes abruptas se presentan con tonalidades claras y las zonas planas en colores oscuros. El escarpe del Golfo se puede apreciar claramente en tonos claros en la parte superior izquierda de esta figura, delineando el parteaguas en el Valle Chico, desvaneciéndose las tonalidades claras en el plateau Matomí, por la presencia de las mesetas con bajas pendientes. Las tonalidades claras aparecen nuevamente a partir de la sierra de Santa Isabel, prolongándose hasta la sierra de Calamajué. En esta figura también se observa el relieve de baja pendiente en tonalidades oscuras, asociado a valle Chico, llanos de San Fermín, planicies del arroyo Matomí, del Huerfanito, Punta Bufe y de San Luis Gonzaga. De manera general se puede apreciar que las zonas grisáceas son las más abundantes en la zona de estudio, correspondiendo a las pendientes con valores entre el 10-30%. En la zona del plateau Matomí, sobresale por su dimensión una meseta en color oscuro denotando un gran bloque casi horizontal. Esta zona también presenta coloraciones claras en los escarpes de las mesetas.

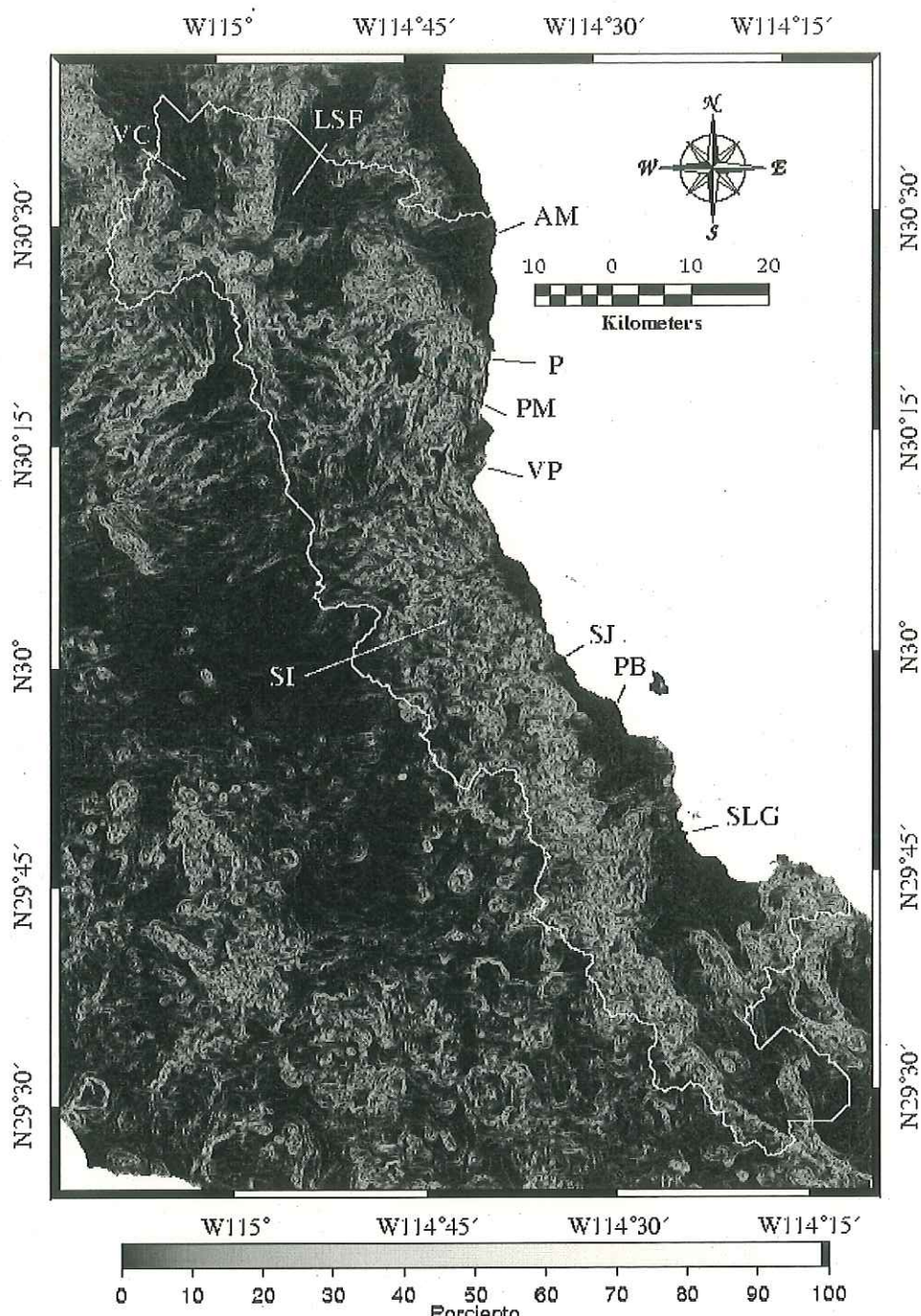


Figura 14. Distribución espacial de las pendientes en % de todo el MDT, delimitándose la zona de estudio con la línea blanca. las localidades se abrevian VC (Valle Chico), LSF (Llanos de San Fermín), AM (arroyo Matomí), P (Puertecitos), PM (Plateau Matomí), VP (Volcan Prieto), SI (sierra Santa Isabel), SJ (San Judas), PB (Punta Bufe), SLG (San Luis Gonzaga).

En la figura 15 se muestra el histograma e histograma acumulativo de las pendientes calculadas para la zona de estudio, enfatizando que solamente se evaluó en aquellas celdas del MDT que estuvieran circunscritas al área de interés indicada con una línea blanca en la figura 14. Las pendientes con mayor frecuencia se ubican entre el rango del 0-5%, siendo el 2% el valor más alto. Del histograma acumulativo, se puede establecer que en la zona de estudio, las pendientes menores al 20%, representan el 80% del área, mientras que el restante 20% tiene pendientes más abruptas ($>21\%$).

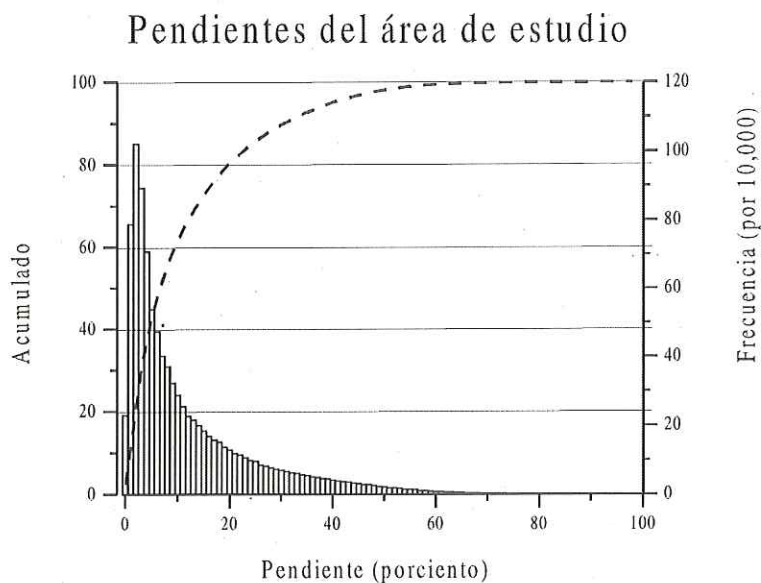


Figura 15. Histograma e histograma acumulativo de la pendiente en valores porcentuales para el MDT de la zona de estudio delimitada por una línea blanca de la figura 14.

Se reagruparon los valores de la pendiente de acuerdo a la clasificación propuesta por Demek (1972) que define 6 categorías indicadas en la tabla VI. A cada una de estas categorías de pendiente, se les puede asociar un uso de suelo como se especifica en el anexo 4.

Tabla VI. Clasificación de acuerdo al rango de la pendiente, tomada de Demek (1972).

Clase	Porcentaje	Rango	Terminología
1	0 - 1 %	0° - 0° 30'	Planicies
2	1 - 4 %	0° 30' - 2°	Pendientes ligeras
3	5 - 9 %	2° - 5°	Suavemente inclinada
4	10 - 26 %	5°-15°	Pendientes Inclinadas
5	27 - 70 %	15°-25°	Escarpado
6	> 71 %	25°-35°	Muy escarpado

La distribución de pendientes de acuerdo a esta clasificación, se presentan en la figura 16 donde las pendientes inclinadas representan el 27.9% del área. En segundo término las pendientes ligeras con el 27.7%, y en tercer lugar las pendientes suavemente inclinadas con el 22.2% del área.

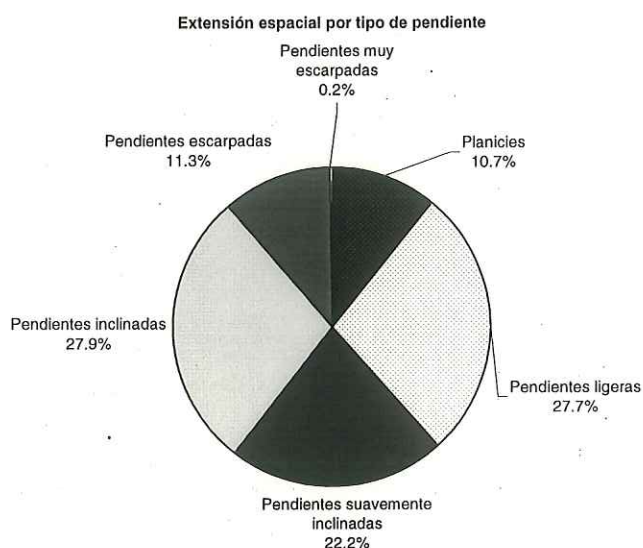


Figura 16. Proporción de pendientes según el esquema de Demek(1972).

Las pendientes suavemente inclinadas, ligeras y las planicies, representan el 60.6% del área y corresponden a terrenos con pendientes menores al 9% de inclinación. La distribución espacial de las pendientes de acuerdo al esquema de Demek(1972), se presenta en la figura 17 que muestra con colores oscuros las zonas con pendientes bajas, localizándose la mayor parte en las geoformas de planicies, mesetas y valles aluviales. Las zonas con pendientes más abruptas en coloraciones claras, que engloban a las geoformas como sierras, cañones y volcanes, consideradas como zonas menos aptas para su aprovechamiento.

Para las zonas clasificadas como planicies, el agua drena más lentamente y origina zonas de inundación. Esta categoría tienen una cobertura del 11% (365 km²), e incluye a los sistemas de aluviones y valles localizados en la parte N, NE y SE, así como en la parte meridional en cercanías del Volcán Prieto, como se puede apreciar en la figura 17. El uso de suelo para las planicies es favorable para el desarrollo, siendo la zona más apta para edificaciones, pero esta sujeta a inundaciones.

Las pendientes ligeras (30" a 2°) están íntimamente relacionadas a las planicies por su vecindad y continuidad del relieve hacia zonas más altas, localizándose en la parte norte en el Valle Chico, llanos de San Fermín, en las planicies del Huerfanito, Punta Bufe y San Luis Gonzaga. Estas pendientes abarcan el 28% (944 km²) y son aptas para soportar actividades de equipamiento rural y urbano.

Las pendientes suavemente inclinadas varían de 2°-5° de inclinación, promueven la formación de afluentes y están asociadas a los pies de monte, localizados en las mismas

zonas que el grupo de pendientes ligeras, cubren el 22% (756 km²). Los terrenos con estas características no son muy aptos para su aprovechamiento.

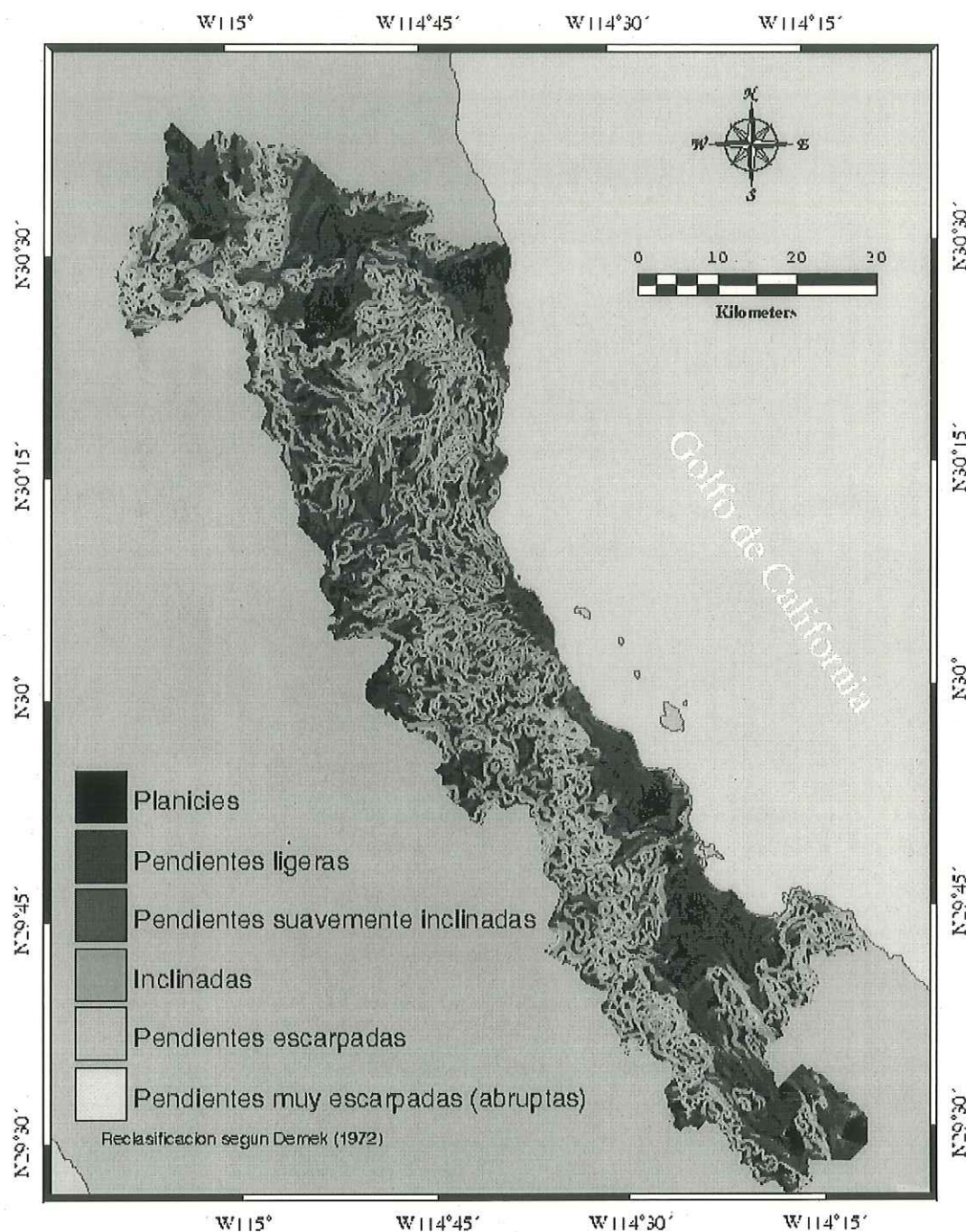


Figura 17. Distribución de la pendiente clasificada con el esquema de Demek (1972).

Las pendientes inclinadas son las más abundantes, con el 27.9% (951 km²) y son las que sufren con mayor frecuencia de procesos de erosión eólica y fluvial. Su aprovechamiento es difícil. Estas pendientes se presentan en los sistemas de serranía en la Sierra Santa Isabel, Calamajué, así como en los cañones de los afluentes en las mesetas del plateau Matomí.

Las áreas escarpadas ocupan solamente el 11% (384 km²), y están sujetas a procesos erosivos intensos. Estas pendientes se ubican, al igual que las pendientes inclinadas, en los sistemas de serranías. Prácticamente están imposibilitadas para cualquier actividad de desarrollo humano. Por último la clase de pendientes muy escarpadas, tiene una representación marginal del 0.18% (6 km²) del área.

VI.3.- Análisis de la orientación de la pendiente.

La orientación de la pendiente conocida también como aspecto, se calculó con la técnica descrita en la sección 5.9, con ayuda del programa *r.slope.aspect* del SIG GRASS y que describe Shapiro (1992). El programa calcula la orientación de la pendiente para cada celda, asignando un valor angular a partir del Este en sentido inverso a las manecillas del reloj.

El aspecto de la pendiente nos proporciona información sobre su distribución espacial con respecto a las geoformas y se puede apreciar por medio de la iluminación artificial del MDT como se muestra en la figura 18, donde la fuente de luz tiene una elevación de 50° del horizonte y un azimut de 75°.

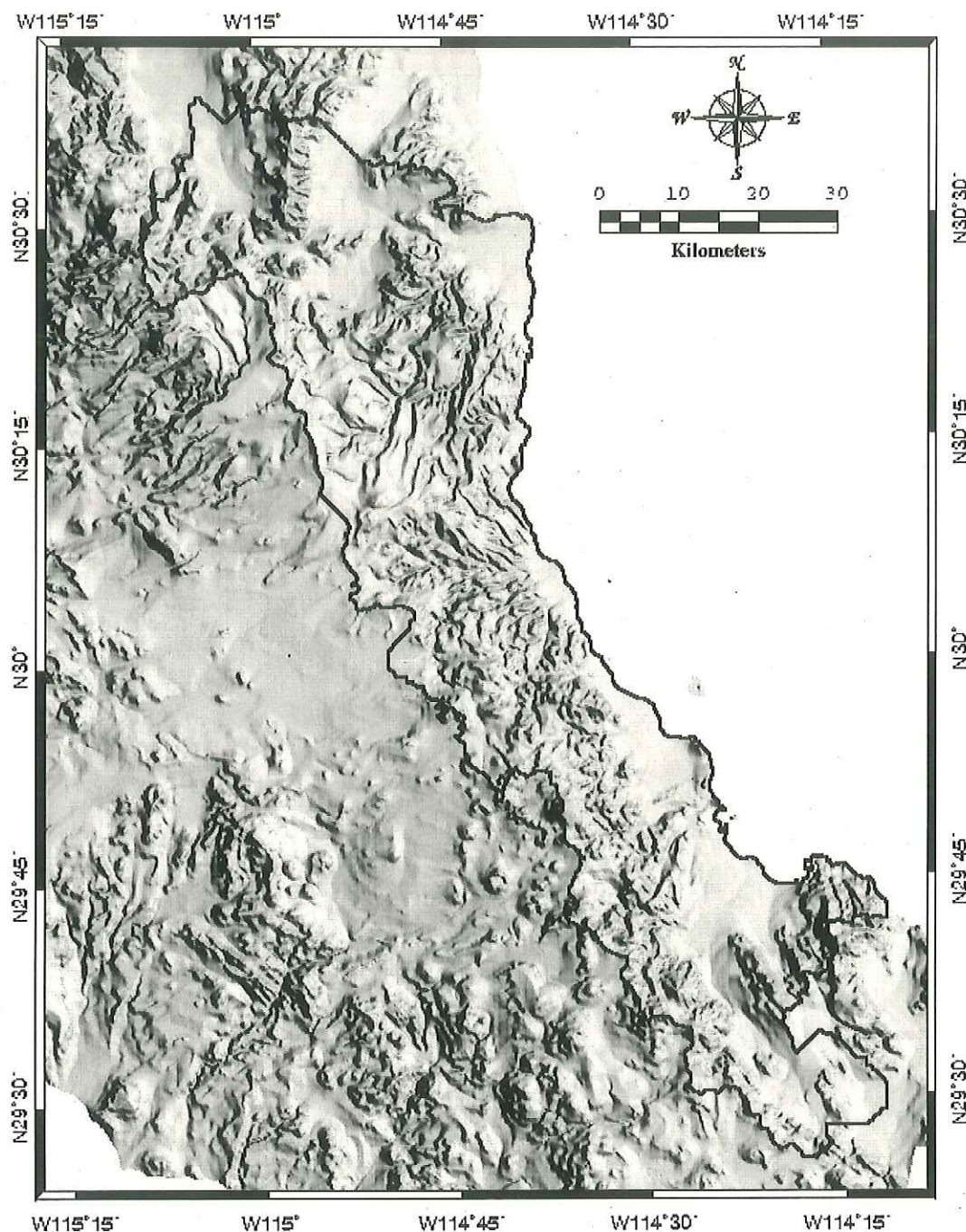


Figura 18. Iluminación artificial del modelo digital del terreno (MDT) ubicando la fuente de luz a 50° sobre el horizonte con un azimut de 75° . La zona de estudio está indicada con una línea oscura.

La zona de estudio esta indicada con una línea oscura, y se puede reconocer la orientación de las mesetas alrededor del volcán Prieto, así como un patrón este-oeste en la sierra media frente a las costas del Huerfanito. En la sierra de San Felipe, se puede observar la orientación Este y Oeste en sus laderas.

Para la presentación de resultados, los valores del aspecto fueron reorientados con respecto al norte, como se muestran en el histograma de la figura 19. Para la zona de estudio, no se identificó ningún patrón específico, sin embargo, se observa recurrencia en los valores múltiplos de 45° , como lo establece Shapiro (GRASS, 1999) esto es consecuencia del método de Horn para el cálculo de los gradientes de z en la dirección x y y , donde se genera un sesgo hacia estos valores. Para las celdas con una pendiente muy baja, se ha observado que terminan con valores de aspecto en múltiplos de 45° sesgando así los resultados. Este efecto se puede filtrar, estableciendo un umbral mínimo en la pendiente para calcular su aspecto. Para las mesetas que se encuentran en la parte norte de la zona de estudio, se hizo un análisis de la orientación de la pendiente que se describe en la siguiente sección.

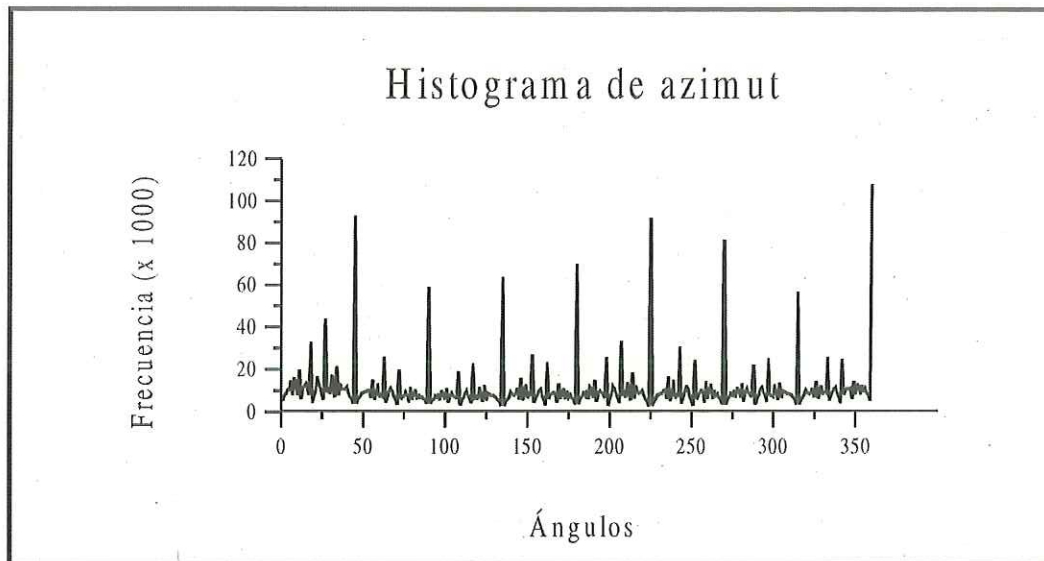


Figura 19. Histograma de la orientación de la pendiente para la zona de estudio.

VI.4.- Análisis de la pendiente y su orientación en el Plateau Matomí.

Se analizó la pendiente de los bloques basculados en las mesetas del plateau del Matomí (figura 20), por medio del modelo digital de elevación calculando la pendiente y su orientación. Con el objeto de presentar los resultados, se segmentó la zona en ventanas como se ilustra en la figura 21, ajustándose a un arreglo de 3 x 3 con una distancia de 16 km por lado. De los 9 recuadros, uno de ellos, el número 7, está fuera de la zona de estudio, por ello no se incluyen los resultados para esta sección.

Además de segmentar la zona de mesetas, se intentó eliminar la pendiente de los cañones y cañadas formadas por los arroyos que la atraviesan con el propósito de hacer más representativos los resultados. Esta tarea se llevó a cabo a través de la definición de zonas de influencia o amortiguamiento, también conocidas como *buffer*, al trazo de los

arroyos el Canelo, los Hemes y algunos de sus tributarios, creando polígonos a su alrededor.

A los arroyos con una clasificación de 1 según Horton-Strahler, se les asignó una zona de influencia de 200 m a través del cauce. A los arroyos con clase 2, una distancia de 450 m y de 600 m para los de clase 3 y mayores (figura 21).



Figura 20. Foto de mesetas basculadas del Plateau Matomí, vista hacia el sur en cercanías del Volcán Prieto. En esta foto se observa físicamente la inclinación de los bloques hacia el Este.

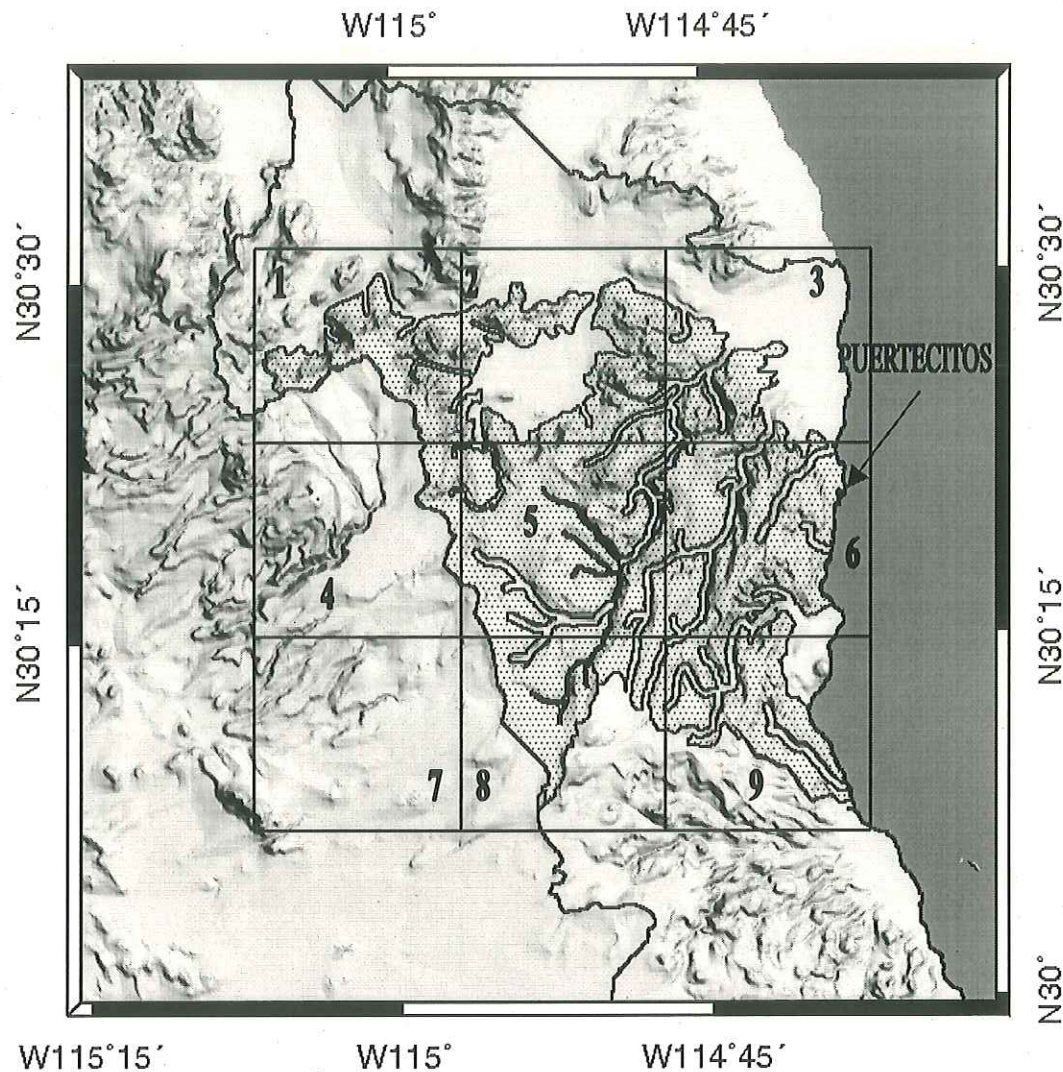


Figura 21. Segmentación de la zona de mesetas del plateau Matomí, en un arreglo de 3 x 3 y límites de las zonas de influencia de los arroyos El Canelo, Los Hemes y sus tributarios indicadas en color oscuro, eliminadas en el análisis de la pendiente y su orientación. El área achurada con puntos es la considerada en el análisis.

Para la presentación de resultados, los valores del aspecto fueron reorientados con respecto al norte y se presentan por medio de diagramas de rosas en la figura 22, un diagrama por cada recuadro. Para la interpretación de las rosas, se enumeraron los recuadros como se indica en la figura 22. Se calcularon histogramas de pendientes para

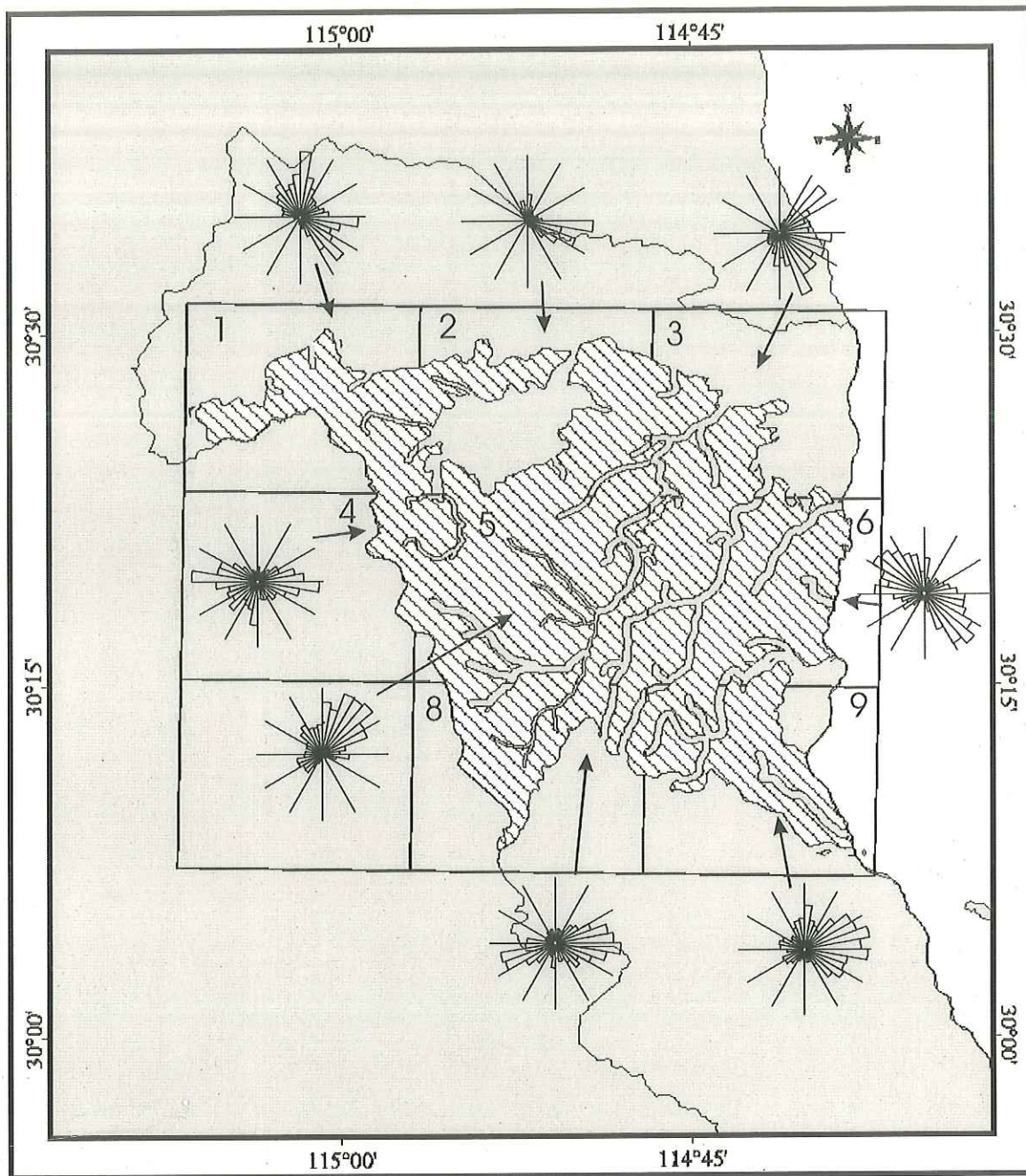


Figura 22. Orientación de la pendiente en bloques del plateau Matomí. La ventana de análisis esta subdividida en 9 partes donde se muestran los histogramas de orientación de cada ventana.

cada uno de los recuadros y se presentan de manera conjunta en la figura 23. En el recuadro 1 se muestra que los bloques tienen básicamente tres componentes de acuerdo con su recurrencia, predominando las orientaciones hacia el N, siguiendo la componente hacia el E y finalmente a 45° SE. Existe una componente importante de la pendiente hacia el Este, orientándose hacia el valle aluvial que se localiza en el recuadro 2. Con respecto a la pendiente del recuadro 1, en la figura 23 se observa una predominancia de valores en el rango del 4 al 12 %, presentados en el recuadro No. 5, donde la frecuencia de celdas con el mismo valor alcanzan los valores máximos. Este comportamiento se preserva en los demás recuadros, con menor frecuencia.

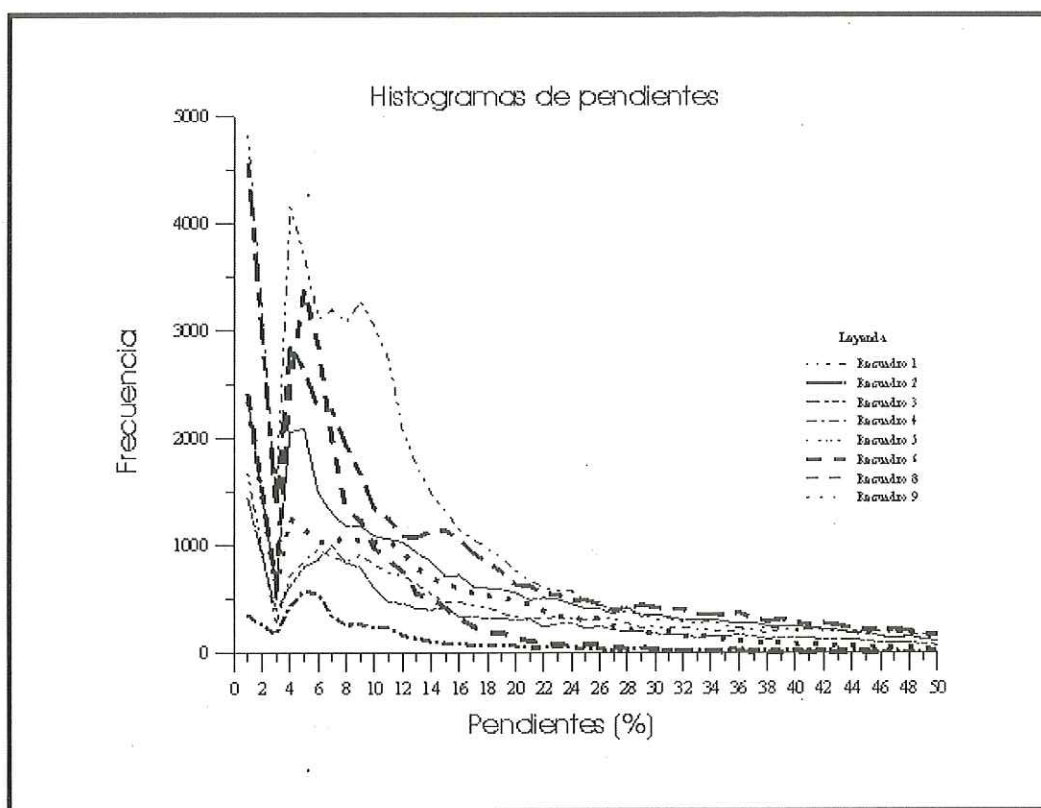


Figura 23. Histograma de las pendientes de los recuadros de la figura 24. Los valores son truncados a partir del 50% por su ausencia de representatividad de las pendientes mayores

En los recuadros 2 y 3 predomina la orientación al E, con valores de frecuencia máxima de la pendiente en los rangos de 4 al 9 %, mientras que el recuadro 2, alcanza su máxima frecuencia en la pendiente del 5%. Cabe destacar que en el recuadro 3 contiene la planicie costera y la pendiente de los bloques es la menor y siguen la orientación de los abanicos aluviales hacia la línea de costa (NE-E-SE).

Para el recuadro 4 se observa como la orientación de los bloques cambia, ya que, predominan las orientaciones hacia el W y al E. Estas orientaciones se deben a que, la parte oriental del recuadro atraviesa el escarpe del golfo, que es el parteaguas entre la vertiente hacia el Pacífico y el Golfo de California de la cuenca. Es por ello que ocurren estas orientaciones opuestas. Para este recuadro, el área considerada es pequeña y la pendiente más frecuente del terreno oscila entre 4 y 6%.

Las orientaciones en el recuadro 5 cambian, predominando los bloques que buzan al NE. Los bloques en esta parte del plateau mantienen la orientación paralela a la dirección del arroyo el Canelo. Este recuadro es el que incorpora la mayor área de mesetas y su pendiente tiene una frecuencia máxima en el 5% y otro valor alto en el 9% con una caída abrupta de la frecuencia entre el rango del 10 al el 15%.

En el recuadro 6 se observa como las pendientes de los bloques tienen orientaciones hacia el NW-SE, donde los bloques se orientan hacia la costa y la máxima ocurrencia de pendientes tiene un valor del 4%, decayendo rápidamente la frecuencia a partir del 7%.

El histograma de las pendientes del recuadro 8, muestra a los bloques con dos direcciones preferenciales, siendo la dirección E la orientación con mayor frecuencia, así

como dirección SW, presentando un comportamiento similar al recuadro 4 que también contiene parte del escarpe del golfo. La pendiente del recuadro 8 se comporta de manera similar a los demás, presentando una mayor frecuencia en las pendientes de 5%, decayendo rápidamente en el rango del 6-8% sus inclinaciones.

Por último, en el recuadro 9 los bloques se orientan hacia el NE, y de manera análoga al recuadro 6, los bloques basculados apuntan hacia la línea de costa y el volcán Prieto. Apparently, esta geoforma se ubica en una zona en la que convergen las pendientes de los recuadros costeros. Este patrón de pendientes de los recuadros costeros son dirigidos hacia el Este y pueden ser apreciados en el estereopar Zamora (3) y en el general (6) y puede ser de origen tectónico.

VI.5.- Hidrología superficial

La extracción de los cauces se efectuó por los métodos desarrollados por Hellweger (1997) y Ehlschlaeger (1991), obteniendo las trayectorias de los afluentes y la delineación de las cuencas a través del procesamiento de un MDT. Los resultados entre ambos métodos son similares en la delineación de los cauces de los arroyos y en la definición de los parteaguas en las cuencas, sin embargo, difieren en el número de cuencas obtenidas. Se aplicó un tercer método para el análisis hidrológico, a través del programa RiverTools que genera la red hidrológica de acuerdo al esquema de Horton-Strahler y otros parámetros de las cuencas que serán presentados posteriormente.

En la aplicación de los métodos fue necesario estandarizar criterios de extensión territorial, tales como, tamaño de celdas, longitud mínima de arroyos, áreas máximas y/o

mínimas para las cuencas, nombres de archivos de entrada y salida, etc. La dimensión de las celdas en el MDT se estableció de 60 m por lado, que representa una superficie de 3600 m² para cada celda. El umbral de análisis para considerarse a una cuenca independiente se estableció en 1000 celdas, que representan una área de ~3.6 km².

Resultados del método HEC-PREPRO propuesto por Hellweger:

Los resultados más importantes obtenidos por este método fueron el número de cuencas, el cálculo de sus áreas, y la delineación de las cuencas y sus arroyos.

Durante una salida de campo, se ubicaron con GPS algunos de los cruces de arroyos a lo largo de la brecha que une a las localidades de San Luis Gonzaga con Puertecitos. La ubicación de estos puntos coincide con el trazo los arroyos calculados por el método, como se puede observar en la figura 24. Para la evaluación del método, la trayectoria de los arroyos se confrontó con la hidrología superficial digitalizada de las cartas 1:50,000 de INEGI, observándose concordancia en los trazos, como se puede observar en la parte central de la figura 24. El método obtuvo 9 cuencas presentadas en la figura 25 y un reporte de sus áreas en la tabla VII.

Las cuencas extraídas del modelo fueron confrontadas con las propuestas por INEGI en su carta hidrológica 1:1,000,000 y en su estudio hidrológico del estado de Baja California (1995), donde existe una generalización de los rasgos, presentando discrepancias originadas en gran medida por la diferencia de escalas como se puede apreciar en la figura 26.

Los resultados se verificaron sobreponiendo los límites de las cuencas y la red hidrológica a un compuesto en falso color de la imagen Landsat TM, comprobando que concuerdan los rasgos topográficos de la zona de estudio y el trazo de los arroyos del método de Hellweger.

Tabla VII. Cuencas hidrológicas obtenidas por el Método Hellweger con su respectiva área.

NUMERO	NOMBRE	AREA PERÍMETRO		
		(km ²)	(m)	%
1	Parral	380	112,263	10.7
2	Matomí	626	184,944	17.5
3	El Canelo	314	134,495	8.8
4	San Rafael	199	113,016	5.6
5	Los Hemes	289	110,382	8.1
6	El Placer	191	88,005	5.4
7	Las Palmitas	724	158,043	20.3
8	Zamora	190	109,616	5.3
9	Santa María	654	186,667	18.3

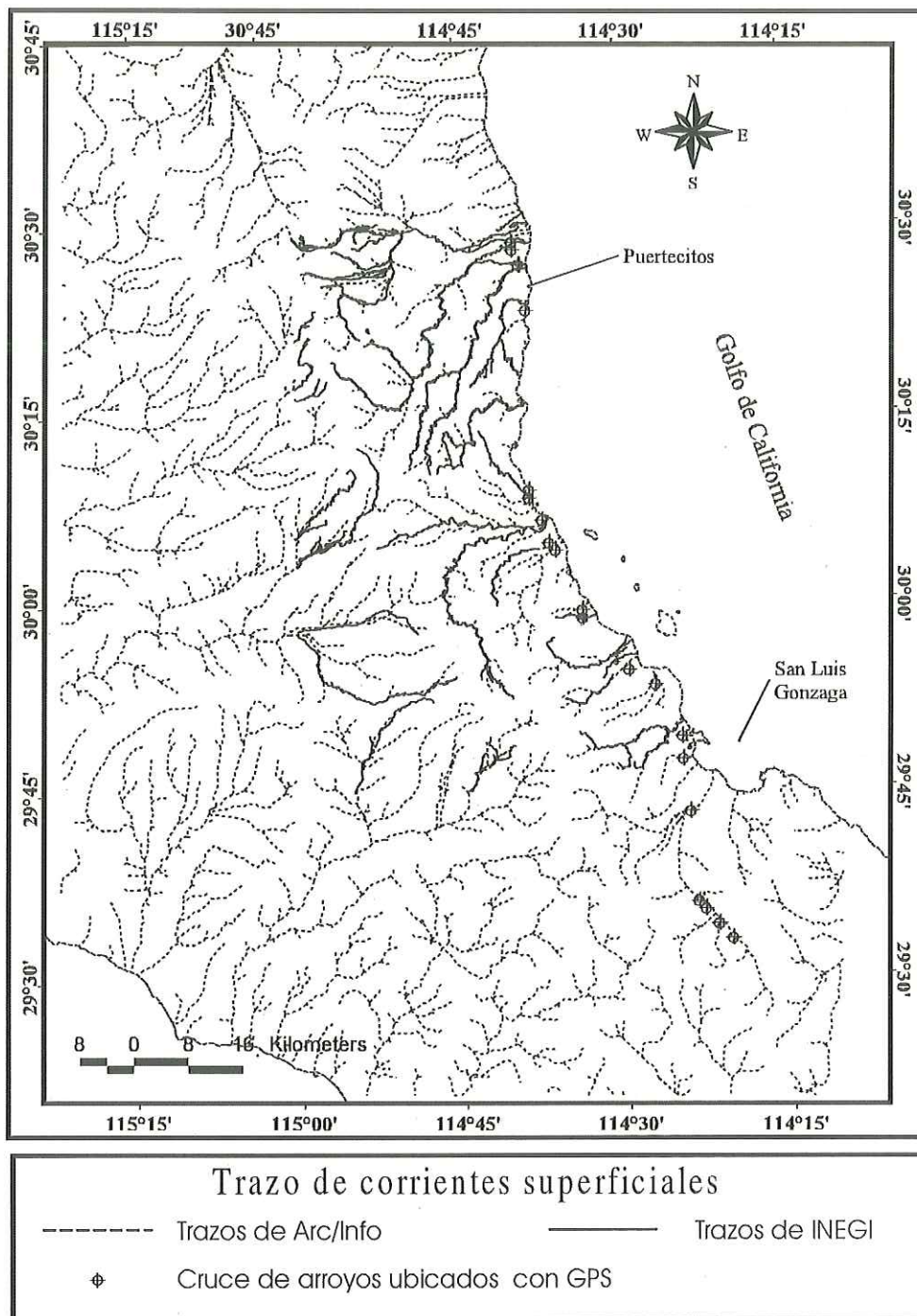


Figura 24. Red hídrica calculada por el método de Hellweger y comparación con la hidrología superficial digitalizada de las cartas 1:50,000 de INEGI. Los puntos indican la ubicación del cruce de arroyos con la terracería entre la Bahía de San Luis Gonzaga y Puertecitos.

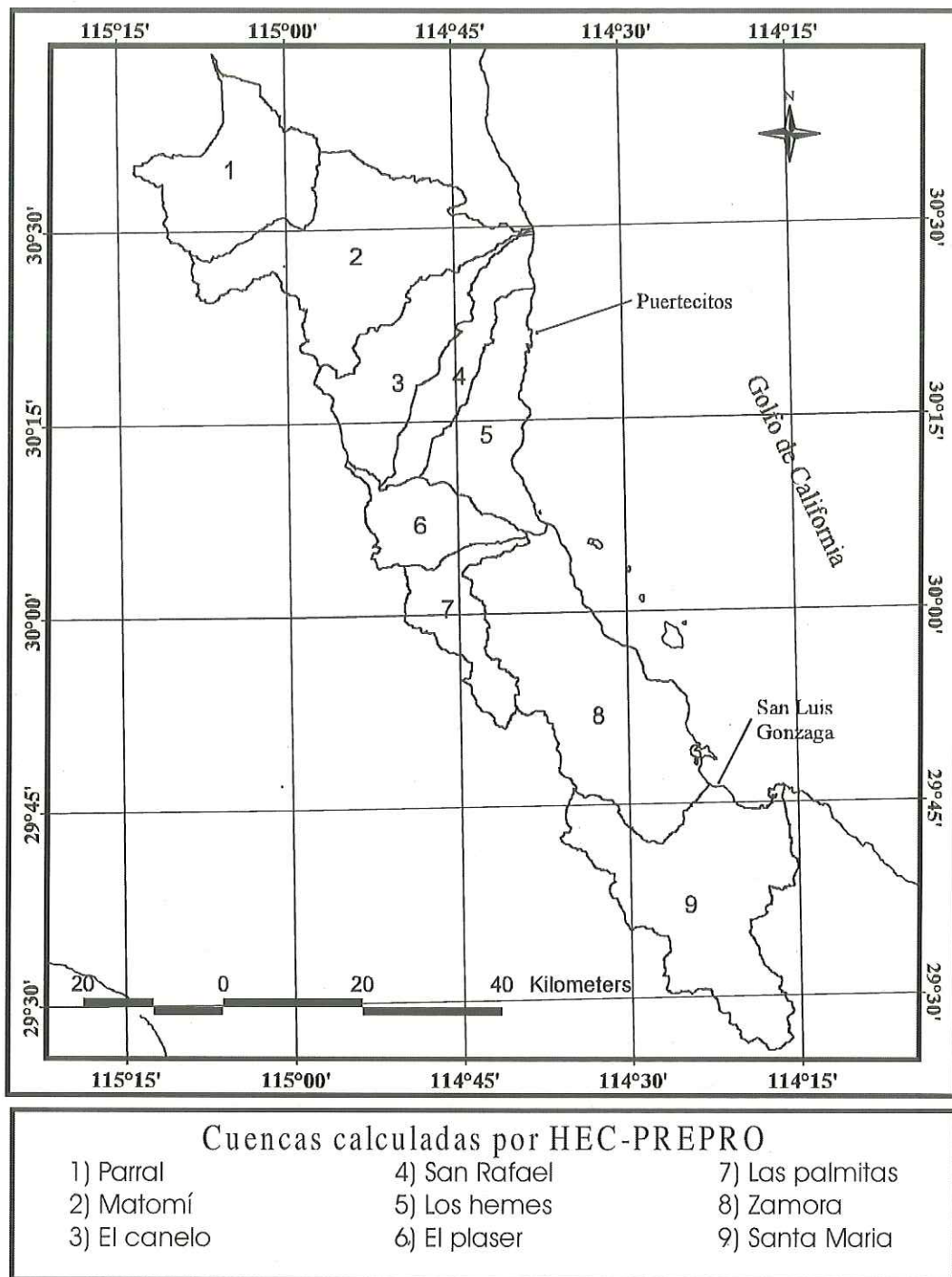


Figura 25. Cuencas calculadas por el método de Hellweger.

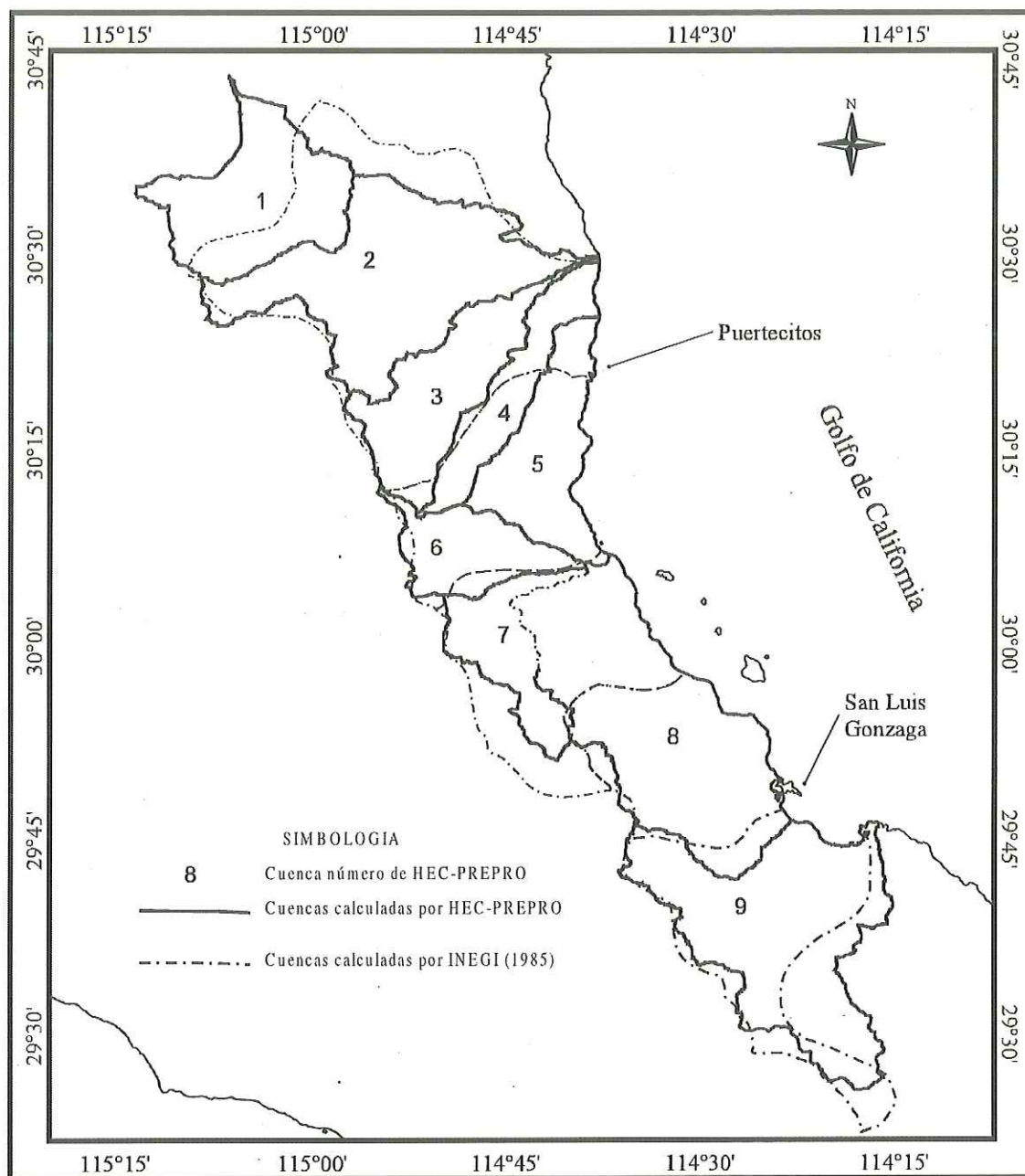


Figura 26. Límites de las cuencas propuestas por INEGI (1985) en la carta hidrológica escala 1:1'000,000 y límites obtenidos del procesado del MDT con el método Hellweger (1997). La diferencia se debe al mayor nivel de generalización de la información en la carta de INEGI.

Resultados por el método de Ehlschlaeger.

Los resultados obtenidos por el método de Ehlschlaeger, se obtuvieron a través del programa *r.watershed* que está integrado en el SIG GRASS. A diferencia del método anterior, éste genera los resultados en una rejilla regular, sin embargo, los resultados hidrológicos son similares en cuanto al flujo y red de drenaje. La diferencia entre ambos métodos es el nivel de agregación de las cuencas, ya que el programa de Ehlschlaeger, obtuvo 22 cuencas contra las 9 cuencas del primero. Aunque el número de cuencas difiere, los límites de éstas coinciden. El primer método integra varias cuencas en una, como se puede observar en la figura 27. Existe concordancia en la definición de 4 cuencas y las cinco restantes obtenidas por el primer método se dividen en subcuencas usando este método. La relación entre las cuencas obtenidas por los dos métodos, se muestra en la tabla VIII. En esta tabla, se repite la ocurrencia de una misma cuenca obtenida por el segundo método en el primero, y esto se debe a que las parteaguas no coinciden en su totalidad como se puede apreciar en la figura 27.

Para la delineación final de las cuencas en la zona de estudio, se adoptó las 22 obtenidas en el segundo método, ya que éste hace una segmentación más detallada que el primero. La extensión y perímetro de cada cuenca se presenta en la tabla XI con su distribución en la figura 28. Las fronteras de las cuencas así como la red hidrológica también se pueden apreciar en la figura 29, así como en el espaciomapa (ver anexo cartográfico).

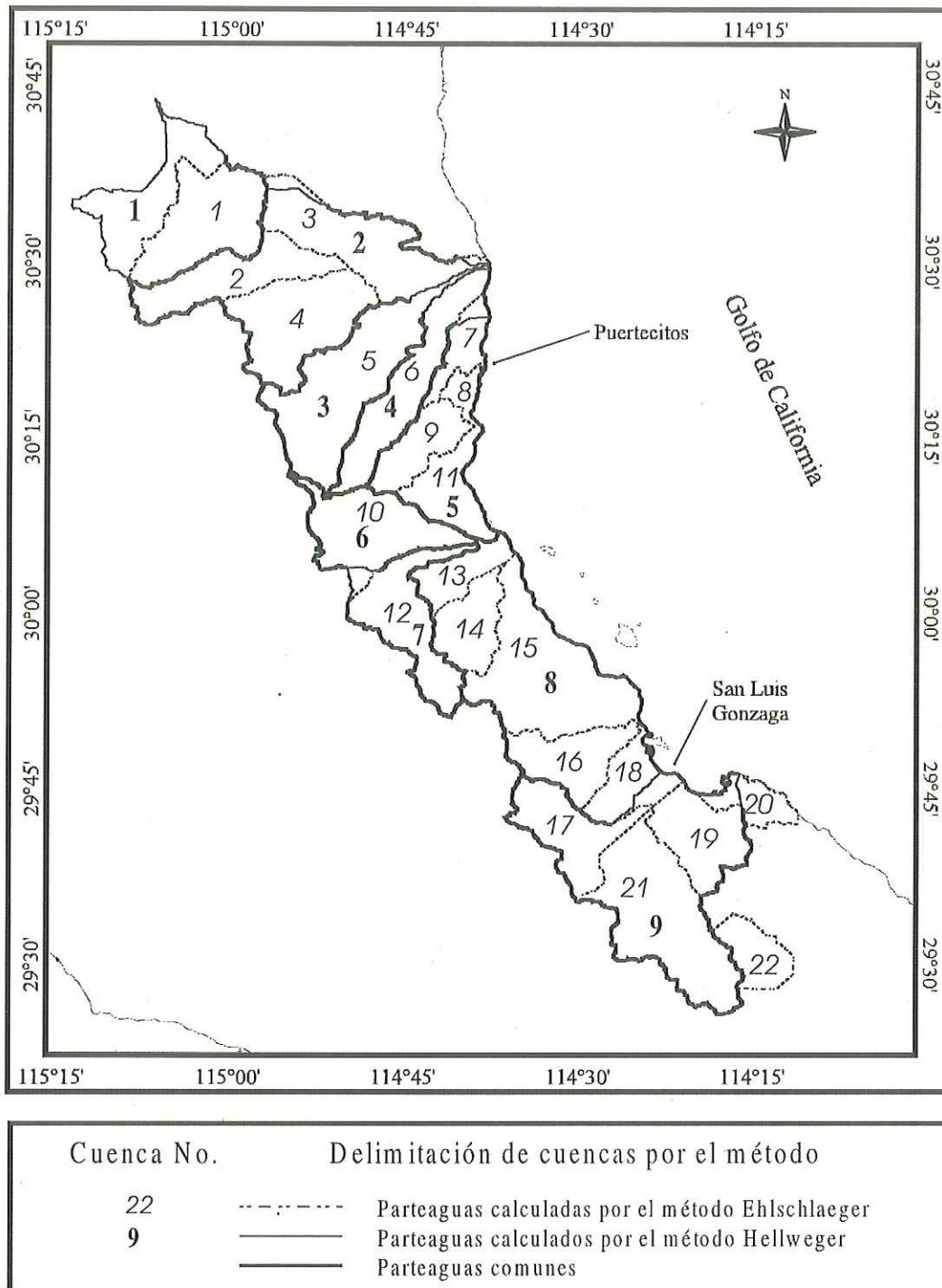


Figura 27. Diferencias en la delimitación de las cuencas por ambos métodos. Los parteaguas coinciden en la mayoría de los casos, pero también existen ligeras diferencias. Se enumeran las cuencas de cada método, diferenciado en *itálicas* las del método de Ehlschleager.

Tabla VIII. Relación entre las cuencas obtenidas por el método de Hellweger y por el de Ehlschlaeger. Las cuencas obtenidas el primero engloba a las del segundo.

Hellweger Método 1 (No. cuenca)	Ehlschlaeger Método 2 (No. cuenca)
1	1
2	2,3 y 4
3	5
4	6
5	7,8,9,11
6	10
7	12
8	13,14,15,16, 18
9	17,18,19,20,21

Tabla IX. Número, nombre, extensión y perímetro de las cuencas hidrológicas obtenidas para la zona de estudio por el método de Ehlschlaeger. El orden de las cuencas sigue su distribución de norte a sur.

NUMERO	NOMBRE	AREA (km ²)	PERIMETERO (m)	%
1	Parral	215	100,203	6.1
2	San Fermín	170	111,963	4.8
3	Matomí	232	115,323	6.6
4	Las Blancas	233	99,843	6.6
5	El Canelo	303	144,365	8.6
6	Los Hemes	207	137,045	5.9
7	Punta San Fermín	63	65,283	1.8
8	Puertecitos	29	42,362	0.8
9	Sierra Santa Isabel	100	66,002	2.8
10	El Placer	193	103,803	5.5
11	El Huerfanito	108	76,323	3.1
12	Zamora	180	123,964	5.1
13	El Volcán	77	61,442	2.2
14	La Olvidada	108	68,402	3.0
15	San Judas	329	132,845	9.3
16	Santa María	132	81,123	3.7
17	Mesa Prieta	151	99,603	4.3
18	San Luis Gonzaga	97	71,921	2.8
19	Valle Calamajué	143	77922	4.1
20	Punta Final	59	60242	1.7
21	Las Arrastras	321	129751	9.1
22	La Josefina	79	51602	2.2

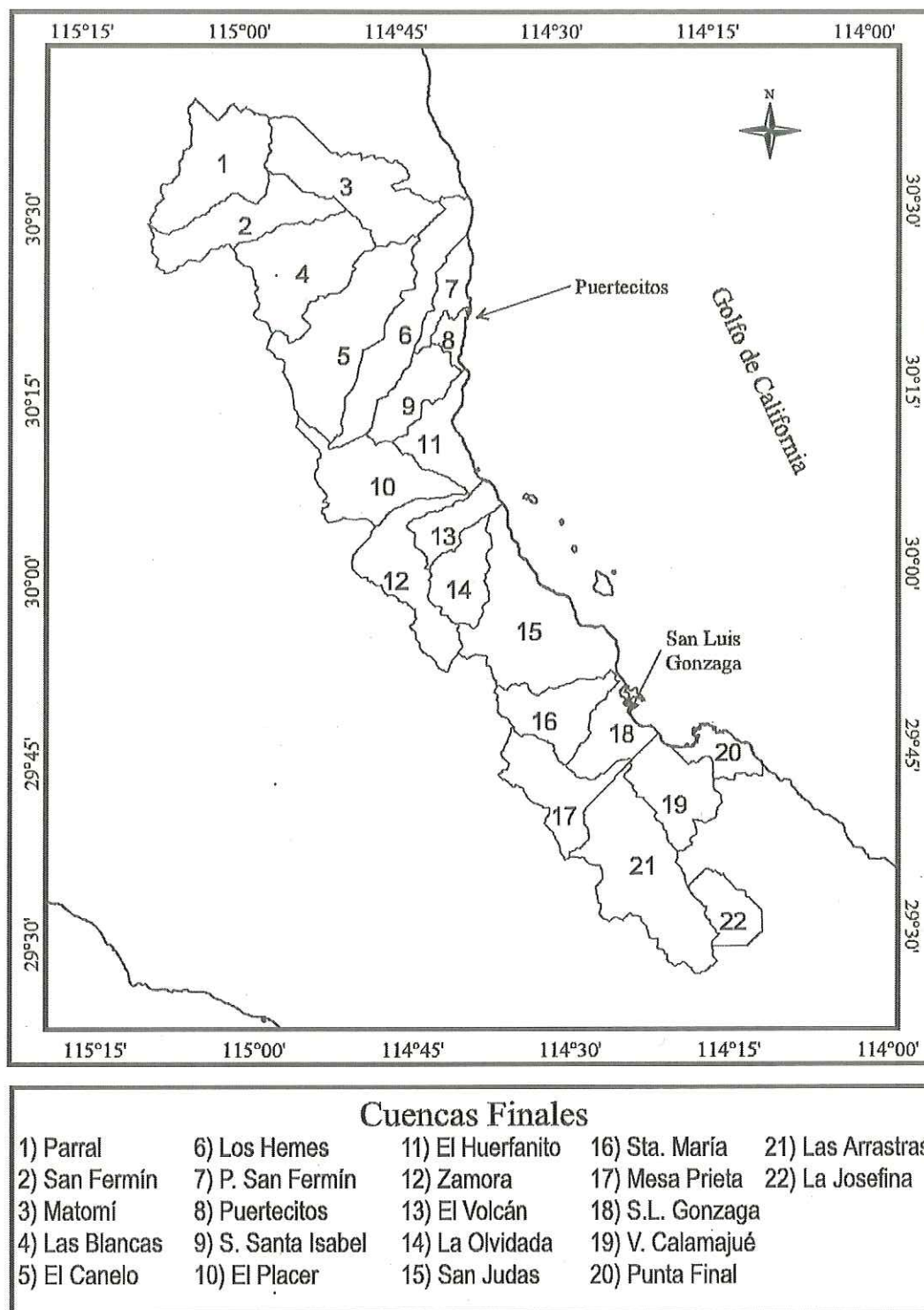
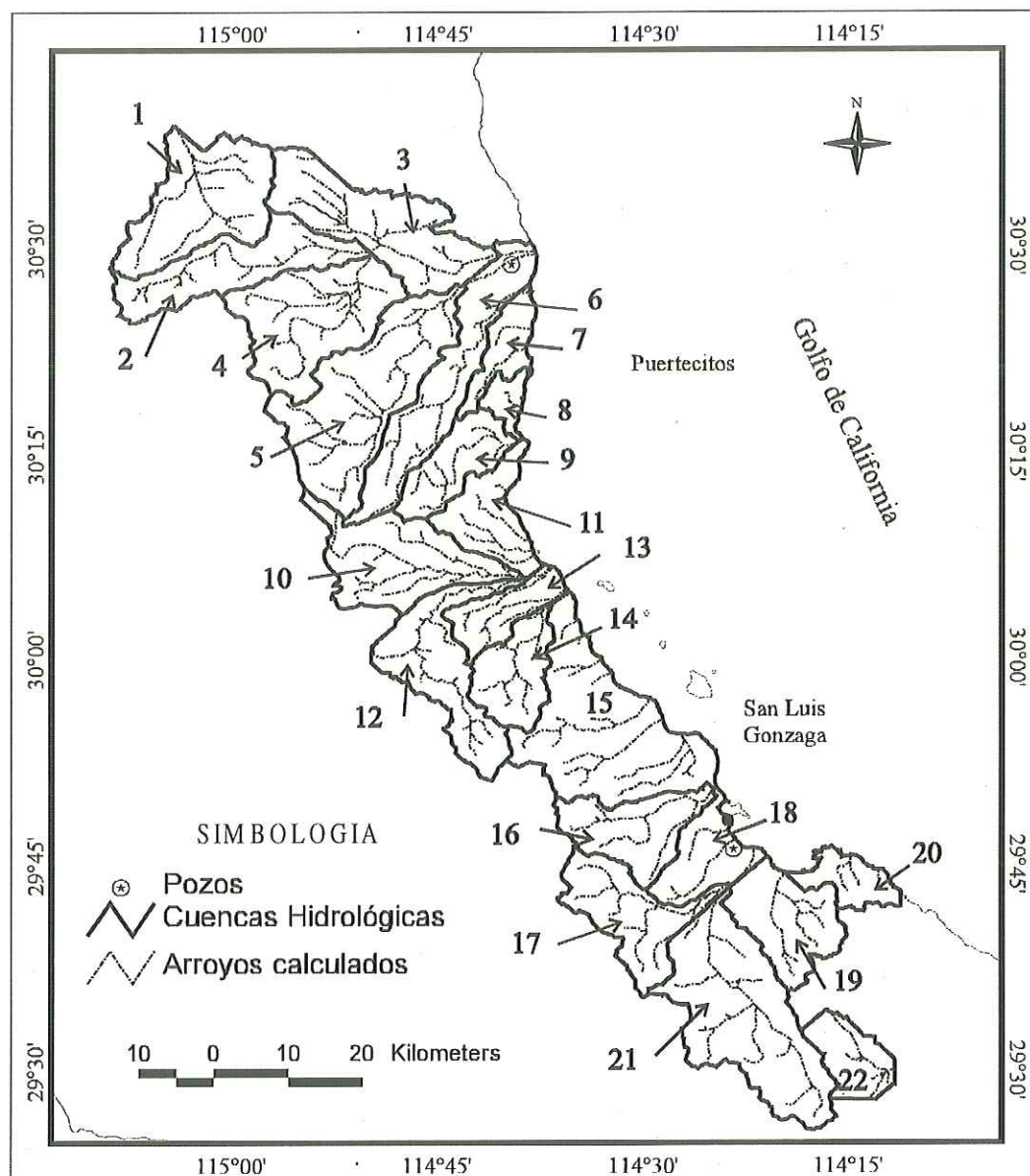


Figura 28. Cuencas obtenidas por el método de Ehlschlaeger, tomándose como la delineación final de los parteaguas.



Cuencas Finales

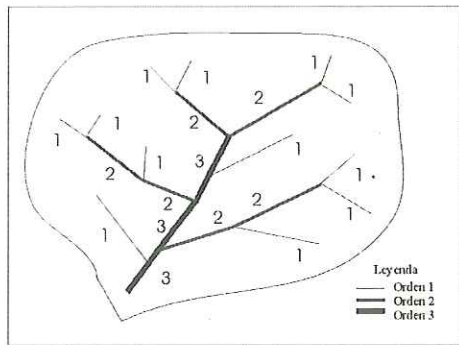
- | | | | | |
|----------------|--------------------|-------------------|------------------|-------------------|
| 1) Parral | 6) Los Hemes | 11) El Huerfanito | 16) Sta. María | 21) Las Arrastras |
| 2) San Fermín | 7) P. San Fermín | 12) Zamora | 17) Mesa Prieta | 22) La Josefina |
| 3) Matomí | 8) Puertecitos | 13) El Volcán | 18) S.L. Gonzaga | |
| 4) Las Blancas | 9) S. Santa Isabel | 14) La Olvidada | 19) V. Calamajué | |
| 5) El Canelo | 10) El Placer | 15) San Judas | 20) Punta Final | |

Figura 29. Delineación de las cuencas finales obtenidas por el método Ehlschlaeger y la hidrología superficial por el método Hellweger. Ubicación de los pozos que abastecen a las poblaciones del área.

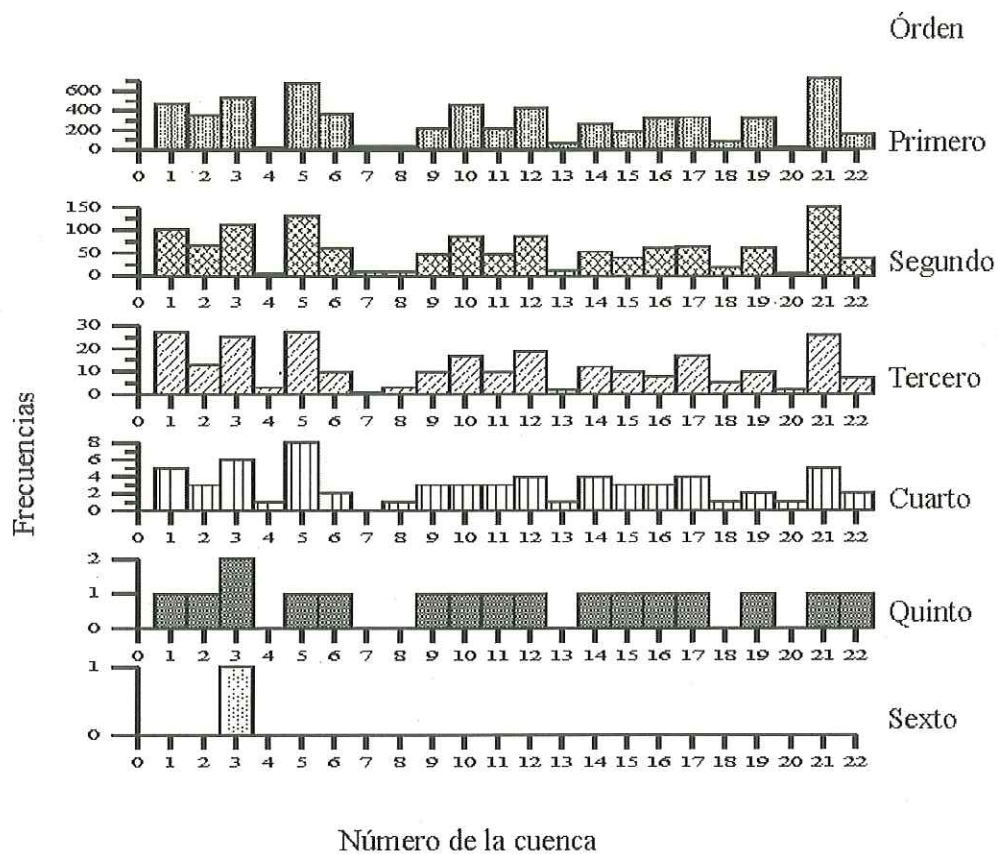
Los métodos de Hellweger y Ehlschlaeger descritos con anterioridad, no realizan la clasificación de los arroyos con el esquema propuesto por Horton- Strahler. Para esto se utilizó el paquete Rivertools versión 2, que además calcula otros parámetros hidrológicos que permiten caracterizar con mayor detalle la hidrología superficial. Se hizo un análisis independiente para cada una de las 22 cuencas definidas por el método Ehlschlaeger obteniendo índices para cada una.

Como se describió en la sección 5.9, el orden de Horton-Strahler es un orden jerárquico de la unión de los arroyos y en la figura 30 b) se muestra la frecuencia de arroyos para cada orden. Con el parámetro de orden-frecuencia se puede relacionar el patrón de drenaje de cada cuenca y este a su vez asociarlo con la composición litológica. En la misma figura se observa la semejanza en el comportamiento de algunas cuencas con respecto a sus frecuencias, comportamiento que se mantiene desde el primer hasta el cuarto orden, a partir del quinto orden las frecuencias caen drásticamente. La agrupación de las cuencas por sus frecuencias se asocia de la siguiente manera:

- A. Parral (1), Matomí (3), El Canelo (5), Las Arrastras (21).
- B. San Fermín (2), Los Hemes (6), Sierra Santa Isabel (9), El Placer (10), El Huerfanito (11), Zamora (12), El Volcán (13), La Olvidada (14), San Judas (15), Santa Maria (16), Mesa prieta (17), La Josefina (22).
- C. Las Blancas (4), Punta San Fermín (7), Puertecitos (8), San Luis Gonzaga (18), Valle Calamajué (19), Punta Final (20).



a)



b)

Figura 30. Clasificación de los tributarios según el sistema de Horton-Strahler. En la parte inferior de cada histograma se enumeran las cuencas según la tabla IX y las frecuencias de los arroyos. a) esquema gráfico de la clasificación del orden, b) histogramas de los órdenes.

En el grupo A están las cuencas con las frecuencias y valores más altos en la clasificación Horton-Strahler, conformadas principalmente por sierras bajas, planicies y valles, que permiten el desarrollo de redes dendríticas y subdendríticas. Las cuencas el Parral y Matomí cuentan con geoformas de valles aluviales en la parte central, enmarcadas por serranías de rocas volcánicas terciarias y graníticas cretácicas, produciendo que se desarrollen patrones dendrítico y subdendríticos. Para las Arrastras, su litología está regida principalmente por rocas graníticas cretácicas en la sierra Calamajué, produciendo el patrón dendrítico. En la cuenca el Canelo, en el valle intramontañas enmarcado por rocas volcánicas, la red de drenaje presenta un patrón dendrítico.

Por otro lado, el grupo B cuenta con el mayor número de cuencas. En la parte norte las cuencas San Fermín, Los Hemes, sierra Santa Isabel y El Huerfanito se encuentran influenciadas por el plateau Matomí, que es compuesto por rocas volcánicas que son relativamente las más jóvenes y por lo tanto menos afectadas a la erosión. El plateau es afectado por fallas de desplazamiento vertical, que forma patrones de drenajes dendrítico y subdendrítico. Para las cuencas El Placer, Zamora, El Volcán y la Olvidada, los patrones de drenaje son dendríticos y subdendríticos, influenciados por las geoformas de sierras (alta, media y baja), difiriendo de las anteriores en su litología conformándose de rocas metamórficas y volcánicas. Por último las cuencas San Judas, Sta. María y Mesa Prieta, cuentan con geoformas de sierras medias y bajas con rocas graníticas y volcánicas.

El grupo C está compuesto principalmente de planicies, valles, sierras medias y bajas, produciendo redes dendríticas. En la parte norte de la zona de estudio se localizan las cuencas Las Blancas, Punta de San Fermín y Puertecitos. La primera se constituye de rocas

volcánicas del plateau Matomí, contando con un patrón dendrítico menos densificado, en comparación a las cuencas adyacentes. Esta cuenca se encuentra entre el límite del escarpe del Golfo, y sus mesetas no están muy disectados en comparación con las demás cuencas del plateau. Esta cuenca a pesar de contar con un valle aluvial no desarrolla una red de drenaje tan densificada como los valles aluviales que descargan en el cauce del arroyo Matomí. Las cuencas punta de San Fermín y Puertecitos, se localizan en la parte NE del plateau, y son influenciados por las rocas volcánicas produciendo patrones dendríticos de poca extensión de orden pequeño.

En la parte sur de la zona de estudio se localizan las cuencas San Luis Gonzaga, Punta Final y Valle Calamajué. La primera a pesar de estar conformada principalmente por rocas sedimentarias cuaternarias. La formación de arroyos es mínima a pesar que está influenciada por los aportes que recibe de la sierra al SW; la geoforma que prevalece son planicies produciendo un patrón dendrítico. Para el caso de las otras dos cuencas, se constituyen principalmente de rocas graníticas y volcánicas, que producen los patrones dendríticos y subdendríticos.

El anexo 5 contiene un concentrado de resultados hidrológicos para cada una de las 22 cuencas calculados con el programa Rivertools, incluyéndose el histograma de la clasificación de arroyos Horton-Strahler, el patrón de drenaje, altura de descarga, un gráfico con la delimitación de la cuenca y su red hidrológica, así como un perfil topográfico del arroyo principal.

En la tabla X se presentan otros índices hidrológicos calculados por el programa Rivertools que caracterizan con mayor detalle cada una de las cuencas. Los índices que se incluyen son los siguientes:

- A) (O) Orden de Strahler: Orden máximo según la clasificación de Horton-Strahler del cauce principal en la cuenca.
- B) (A) Área de captación del arroyo principal en la cuenca: Es el área del arroyo principal, que siempre es menor que la calculada por los otros dos métodos que abarcan toda la red en la cuenca.
- C) (R) Relieve de la cuenca: Diferencia de altura entre los valores máximo y mínimo en la cuenca.
- D) (LT) Longitud total de los canales: Distancia total de la red hidrológica de la cuenca.
- E) (DD) Densidad de drenaje: Cociente de la longitud de los tributarios y el área de drenaje.
- F) (DF) Densidad Fuente: Cociente del número de tributarios en una red de drenaje (magnitud) y el área de la cuenca.

Los resultados de la tabla X muestran que solamente la cuenca Matomí (3) alcanza un sexto orden y tiene menor densidad de drenaje que la cuenca Josefina que alcanza el valor máximo de 3.1 km^{-1} , considerándose a la cuenca Matomí como una de las más importantes.

Cabe destacar que para la zona de estudio, los arroyos de mayor importancia para las localidades cercanas son el arroyo Matomí y el arroyo Santa María, que recargan los acuíferos de los que se abastecen los pobladores de la región. Las localidades más importantes de la zona de estudio son Puertecitos y San Luis Gonzaga, que se abastecen de agua de pozos ubicados en las cercanías de estos poblados. Para la primer localidad existe un pozo a 15 km al norte de Puertecitos, en la planicie costera del arroyo Matomí y para la segunda, existen un par de pozos en la planicie costera de San Luis Gonzaga, sobre el lecho del arroyo Santa María que se localiza aproximadamente a 5 km al SE de San Luis Gonzaga (figura 29).

Tabla X. Índices hidrológicos calculados con Rivertools para cada cuenca.

No.	Nombre	O	A (km ²)	R (km)	LT (km)	DD (km ⁻¹)	DF (km ⁻²)
1	Parral	5	196.7	1.5	542.8	2.8	2.4
2	San Fermín	5	146.5	1.5	294.2	2.0	2.4
3	Matomí	6	209.6	1.0	611.0	2.9	2.5
4	Las Blancas	4	225.0	0.9	108.4	0.5	0.1
5	El Canelo	5	292.4	1.0	576.6	2.0	2.3
6	Los Hemes	5	157.4	0.9	326.0	2.1	2.3
7	Punta San Fermín	3	19.9	0.6	38.7	1.9	1.8
8	Puertecitos	4	12.9	0.4	24.6	1.9	2.4
9	Sierra Santa Isabel	5	94.9	0.7	176.9	1.9	2.3
10	El Huerfanito	5	181.5	0.9	368.1	2.0	2.5
11	Zamora	5	24.4	0.5	41.1	1.7	2.1
12	El Placer	5	169.3	1.1	383.1	2.3	2.5
13	El Volcán	4	33.5	0.5	65.9	2.0	2.0
14	La Olvidada	5	100.0	0.9	191.8	1.9	2.6
15	San Judas	5	69.5	1.0	150.0	2.2	2.7
16	Santa María	5	125.5	1.0	243.6	1.9	2.6
17	Mesa Prieta	5	122.7	1.3	255.8	2.1	2.7
18	San Luis Gonzaga	4	27.4	0.5	79.2	2.9	2.7
19	Valle Calamajué	5	114.3	0.8	322.0	2.8	2.7
20	Punta Final	4	9.0	0.7	19.5	2.2	3.0
21	Las Arrastras	5	290.3	1.3	741.5	2.6	2.5
22	La Josefina	5	60.5	0.6	188.6	3.1	2.6

Las cuencas que aportan descargas al cauce del arroyo Matomí son: Matomí (3), San Fermín (2) y Las Blancas (4). La primera con un sexto orden Horton-Strahler, la segunda con un quinto orden y la última con un cuarto orden, que en su conjunto vierten grandes escurrimientos durante eventos pluviales importantes, como el que suscitó el Huracán Nora en 1997. La composición litológica de cada una de las cuencas influyen en las características de los sistemas de arroyos. Para el caso de la cuenca Matomí, está constituida por rocas volcánicas terciarias y por aluviones derivados de las serranías aledañas. Sus relieves son accidentados y definidos por sierras bajas y valles aluviales, que tienen una densidad de drenaje de 2.9 km^{-1} , el segundo valor más alto en la zona de estudio debido al gran número de arroyos en la parte sur de la sierra de San Felipe.

La cuenca San Fermín esta conformada de rocas volcánicas formando relieves de laderas bajas y valles aluviales, los arroyos son formados por el cambio en el relieve del escarpe del Golfo, alcanzando una densidad de drenaje de 2 km^{-1} . Por último, la cuenca Las Blancas, constituida por rocas volcánicas formando relieves de mesetas y laderas bajas con una densidad de drenaje de 0.5 km^{-1} , la más baja en la zona de estudio.

Para el caso del arroyo Santa María, éste recibe aportaciones de dos cuencas, la Mesa Prieta y San Luis Gonzaga. La cuenca Mesa Prieta (17) tiene una densidad de drenaje de 2.1 km^{-1} , y está constituida principalmente de rocas graníticas asociadas a sierras bajas, que favorece el desarrollo de un patrón dendrítico que descarga en el arroyo Santa María. La cuenca San Luis Gonzaga (18) con una densidad de 2.9 km^{-1} está constituida

principalmente de aluviones promoviendo la formación de patrones subdendríticos de gran densidad.

VII.- DISCUSIONES

El Sistema de Investigación del Mar de Cortés (SIMAC), es un sistema de investigación regional que promueve el desarrollo científico-tecnológico a través de proyectos que conduzcan a resolver problemática regional con la participación de los sectores productivos, académicos y gubernamental. En SIMAC participan centros de investigación y universidades de los estados de Baja California, Baja California Sur, Sonora, Sinaloa y Nayarit. Este trabajo en particular, es una componente del proyecto SIMAC número 970107002 con título “*Caracterización de recursos naturales de la zona costera entre Puertecitos y bahía de san Luis Gonzaga, Baja California, apoyados imágenes multiespectrales de alta resolución*”.

Los estudios enfocados a la evaluación y caracterización de los recursos naturales tradicionalmente se han desarrollado en base a trabajo de campo, en la actualidad se están desarrollando técnicas para la utilización de herramientas alternas que proporcionan información espacial. En la primera guerra mundial se comenzó a utilizar la fotografía aérea como herramienta que proporciona información espacial de forma indirecta limitándose a extensiones reducidas. Hoy en día, se aplican metodologías con imágenes de satélite que proporcionan información a escala local y regional.

Al igual que en otras áreas de las geociencias, en la geomorfología e hidrológica se aplican técnicas que utilizan imágenes satelitales y modelos digitales del terreno (MDT)

apoyados en herramientas como los sistemas de información geográfica (SIG), que están diseñados para el manejo integral de información geográfica y su procesamiento.

El objetivo principal de este trabajo fue caracterizar la geomorfología y la hidrología superficial de la franja costera comprendida entre Puertecitos y San Luis Gonzaga en la vertiente oriental del Estado de Baja California, franja con una extensión de ~100 km de longitud a lo largo del Golfo de California con ~30 km de ancho. El resultado de la caracterización geomorfológica, es la identificación de topoformas con rasgos homogéneos en el relieve, que en términos de ordenamiento del territorio, son unidades básicas de gestión ambiental. La identificación de estas unidades, es la primera fase a desarrollar en los estudios de ordenamiento ecológico o planeación regional, ya que a éstas se les asigna una vocación natural de uso del suelo así como políticas de manejo. Por ello, la importancia de ésta aportación en los programas de desarrollo de esta zona costera con un alto potencial en diversas actividades.

Por otro lado, considerando que el agua es el factor limitante para el desarrollo de la zona, se caracterizó la hidrología superficial como un primer paso hacia la búsqueda de soluciones al problema de disponibilidad de este recurso.

Se generó nueva información para la zona con un nivel de detalle superior a la existente, apoyándose en herramientas avanzadas de computo. Para la geomorfología solo existía la carta fisiográfica estatal a escala 1:1,000,000 elaborada por el INEGI y en hidrología un estudio con la misma escala. La información generada será de utilidad para agencias gubernamentales que contemplen estudios de ordenamiento ecológico, planeación urbana y rural, con la ventaja de que la información esta disponible en formatos de

intercambio digital con un buen control de precisión geográfica para aplicaciones con escalas 1:50,000 y menores, recordando que a escalas chicas se ven objetos grandes y viceversa.

Los estereopares sintéticos, generados a través de la fusión de la imagen Landsat TM con el modelo digital del terreno, fueron el insumo principal en la caracterización geomorfológica, ya que éstos realzan espectacularmente la tercera dimensión del relieve con ayuda de un estereoscopio. La utilización de estas herramientas cartográficas, es uno de los aspectos más relevantes y novedosos en este trabajo, que se apoyó en el esquema de clasificación geomorfológica de Zinc (1989), el cual va de lo general a lo particular, comenzando en las provincias fisiográficas hasta llegar a unidades geomorfológicas homogéneas caracterizadas por el relieve.

La zona de estudio cuenta con sierras y cuencas sedimentarias. Los sistemas de sierras están distribuidas a lo largo del escarpe principal del Golfo que es la frontera natural al oeste de la zona de estudio. Esta frontera es importante porque divide a los sistemas hídricos de la península, que a escala regional vierten sus escurrimientos hacia el Golfo de California y hacia el Océano Pacífico. Las cuencas sedimentarias se ubican en la parte norte y sur de la zona, y están asociados a valles aluviales enmarcados por sierras.

Se identificaron 13 unidades geomorfológicas (Tabla II) que están estrechamente relacionados con su litología. En la parte norte de la zona de estudio se localizan dos complejos de sierras bajas, San Felipe y San Fermín, constituidas por rocas graníticas y volcánicas, produciendo relieves que varían de suaves a escarpados (pendientes 5-40%) con alturas que varían entre los 300 y 500 msnm. También al norte de la zona, se

identificaron valles aluviales, formados de sedimentos provenientes de las sierras de San Felipe y San Fermín. El relieve predominante en los valles aluviales es bajo con pendientes planas y suaves (0-9%) y su altura varía entre los 50-110 msnm, dependiendo de la cercanía hacia la línea de costa.

En la parte NW se presenta la unidad de laderas bajas, constituidas de rocas graníticas y volcánicas, formando relieves con pendientes suaves (5-9%), así como pendientes abruptas en los escarpes de los arroyos. Esta unidad está asociada al escarpe del Golfo en los límites del parteaguas de la vertiente del Golfo, donde existe una preferencia en la orientación del relieve hacia la vertiente Pacífico, como se puede apreciar tanto en los estereopares como en el espaciograma. Las laderas bajas se presentan en rocas metamórficas en la parte media de la zona de estudio y al suroeste están asociadas con rocas graníticas y volcánicas.

Las geoformas que se presentan hacia el sur de las laderas bajas, son un complejo de mesetas constituidas por rocas volcánicas, que tienen una estructura en bloques basculados. Esta geoforma en particular, abarca el mayor cubrimiento de la zona de estudio, con pendientes de ligeras a suaves (1-9%), en algunos sectores son planas (0%) y en las cañadas existen pendientes escarpadas (27-50%).

Por su gran extensión en la zona de estudio y su peculiar expresión geomorfológica, las mesetas basculadas fueron analizadas aplicando la metodología descrita en la sección 5.7 a través del programa *r.slope.aspect* del sistema de información geográfica GRASS, enmascarando las cañadas de los arroyos El Canelo y Los Hemes con sus tributarios, cuantificando así la orientación y pendiente de los bloques. La orientación y pendiente de

los bloques, se reportó de acuerdo a la segmentación indicada en la figura 21. Los bloques se orientan en varios sentidos, como se puede apreciar en los histogramas direccionales de la figura 22, predominando las orientaciones hacia el Este. Esta orientación, es preferentemente perpendicular a la orientación de las fallas normales con orientación NNW del plateau de Matomí, descritas por Martín-Barajas *et al.* (1995) y Stock y Hodges (1990).

El comportamiento de las pendientes en el plateau Matomí en los diferentes sectores se presenta en los histogramas de la figura 23, donde se puede apreciar que para todos los sectores existe una mayor presencia de superficies casi planas con declives del 1%, y una ausencia de relieves con pendientes del 3%. Se incrementa la frecuencia para las pendientes entre 5-15%, mostrando que los bloques no son horizontales en su totalidad, esto se puede observar en la figura 14, donde se muestran las pendientes de la zona de estudio.

En la parte intermedia de la zona de estudio, al sur de las mesetas, se presentan rocas volcánicas, graníticas y metamórficas, que producen cambios en el relieve. En la sierra Santa Isabel se presentan las sierras altas, medias y bajas. Las sierras altas están asociadas a un complejo metamórfico con un relieve predominante de pendientes escarpadas, producidas por plegamientos. Las sierras medias, están constituidas principalmente de rocas volcánicas produciendo relieves escarpados (27-70%). A diferencia de las mesetas del plateau Matomí, éstas rocas volcánicas son disectadas por arroyos con una mayor densidad de drenaje y las estructuras tienen una orientación SW-NE con una edad aproximada de 14 Ma, mientras que las rocas volcánicas del plateau Matomí son más

jóvenes (~3 Ma) motivo por el cual no están tan disectadas por el efecto erosivo de la red fluvial. Las sierras bajas, que se localizan en las cercanías al arroyo San Judas, al igual que las sierras al norte San Felipe y San Fermín, están constituidas por rocas graníticas, manteniendo el mismo relieve escarpado pero con pendientes menos pronunciadas.

Las planicies se encuentran al norte, en la parte meridional y al sur de la zona de estudio, en las cercanías de la línea de costa y se asocian a depósitos sedimentarios, principalmente de aluvión de sus bermas de canales entrelazados. El relieve de este tipo de geoforma es de pendientes planas (0%) a suaves (1-9%). Las terrazas aluviales, están asociadas a depósitos sedimentarios con pendientes planas (0%). Los lomeríos y lomeríos intramontaña son geoformas asociadas principalmente a rocas graníticas.

Uno de los criterios de clasificación geomorfológicas utilizados, se fundamenta en el análisis de la pendiente y su relación con el uso del suelo. Las unidades geomorfológicas con mayor aptitud para su desarrollo, son aquellas consideradas como planicies y valles aluviales que tienen un rango de pendiente entre el 0-9%, en particular aquellas que se ubican cerca la línea de costa, por su atractivo visual, pesquero y turístico. Estas zonas se localizan distribuidas en la parte noreste en los aluviones del arroyo Matomí, en la parte meridional en los aluviones entre San Judas y Punta Bufo, así como la zona sureste de la planicie costera de San Luis Gonzaga, tal como se representan en la figura 14 de pendientes.

Los aluviones de Valle Chico y los llanos de San Fermín, aunque no están cerca de la línea de costa, tienen las mismas características de bajas pendientes. También en las mesetas del plateau de Matomí, en particular al este del arroyo el Canelo, existen zonas con

pendientes ligeras, con altitudes que oscilan entre los 400 y los 600 msnm, dificultándose el aprovechamiento por su difícil acceso.

Las planicies ocupan el 12.2% de la zona, agrupándose varios rasgos morfológicos como se describe en la tabla II. No todos los rasgos comprendidos en las planicies son aptos para el desarrollo humano, en particular la zonas que están comprendidas en aluviones con un patrón hídrico densificado por cauces, ya que se considerado como zonas de peligro por los riesgos fluviales en eventos torrenciales.

Aunque la zona es considerada como una región muy árida con una precipitación promedio de 100 mm al año, se han presentado eventos extraordinarios como el paso del huracán Nora en Septiembre de 1997, que descargó aproximadamente 300 mm en un lapso de 24 hrs. afectando drásticamente las planicies, ocasionando daños severos a la carretera federal No. 5 y a los campos turísticos a lo largo de la costa. Comentan lugareños que estuvieron presentes en el evento, que el cauce del arroyo Matomí se desbordó, cubriendo la mayor parte del aluvión con una lámina continua de agua, que arrastró todo a su paso, incluyendo cantos rodados con diámetros superiores al metro.

El análisis hidrológico de la zona de estudio es otra de las aportaciones de este trabajo, donde se aplicaron técnicas desarrolladas para los sistemas de información geográfica Arc/Info y Grass, con el propósito de extraer del modelo digital del terreno (MDT) la información de hidrología superficial de la zona de estudio. Además se utilizó una tercer herramienta llamada Rivertools V.2, especializada en análisis hidrológico que complementó los resultados con índices y parámetros hidrológicos. Cabe mencionar que el

único estudio hidrológico realizado para esta zona, es el realizado por INEGI en 1985, sin llegar al mismo nivel de detalle.

El primer método, el de Hellweger (Arc/Info), extrae la red hídrica y delinea los parteaguas de las cuencas hidrológicas a través del procesado de un MDT. Al aplicar este método, se obtuvo la red hidrológica y delineación de cuencas regionales que fueron cotejados con los resultados de INEGI (1985), donde la red hidrológica coincidió en su mayoría, no siendo lo mismo para las cuencas.

El segundo método, el de Ehlschlaeger (GRASS), se enfoca a extraer información hidrológica del MDT, para evaluar los procesos de erosión de suelos y entre otros resultados calcula la red hidrológica y las cuencas de drenaje. El primer método obtuvo 9 cuencas, mientras que el segundo 22, observándose diferencias en los resultados. Los límites de las cuencas del primer método delinearón unidades más extensas, agrupando un número similar de cuencas a las reportadas por INEGI(1985), mientras que el segundo método realizó una segmentación en un mayor número de cuencas..

La diferencia entre los dos métodos se reflejó en la delimitación de algunas cuencas, el método de Hellweger(Arc/Info) no fragmentó 5 de las 9 cuencas que el método de Ehlschlaeger(GRASS) subdividió en subcuencas como se aprecia en la figura 27 y se resume en la tabla VIII. Por ejemplo, la cuenca 2 obtenida por el primer método, agrupa a las cuenca 2, 3 y 4 del segundo, que corresponden al área de captación del arroyo Matomí. La cuenca 8 del primer método cuyos afluentes provienen de la sierra Santa Isabel, agrupa a las cuencas 13, 14, 15, 16 y 18 del segundo método, de las cuales la 16 y 18 aportan sus escurrimientos al arroyo Santa María. La cuenca 5 del primero, engloba a las cuencas 7, 8, 9

y 11 del segundo que incluye algunos arroyos de la zona de mesetas, en la provincia volcánica de Puertecitos.

Donde existió concordancia en la delimitación de las cuencas, fue en las 3, 4, 6 y 7 obtenidas por el primer método que corresponden en lo general a las 5, 6, 10 y 12 del segundo, cubriendo áreas similares. La cuenca 1 en ambos métodos, descarga sus escurrimientos al arroyo Parral, en el valle Chico que a su vez se conecta más al Norte al arroyo Huatamote que desemboca al sur de San Felipe cerca de la punta Diggs.

Cada método tiene sus ventajas, el primer método realizó un buen trazo del patrón de drenaje, mientras que el segundo realizó un mejor delineamiento de los parteaguas de las cuencas. Como resultados finales se adoptó lo mejor de cada método, se tomaron las 22 cuencas de Ehlschlaeger (GRASS) y el patrón de drenaje de Hellweger (Arc/Info). Un mayor número de cuencas permite caracterizar mejor la hidrología de la zona de estudio, habilitando así la realización de estudios locales sobre cuencas específicas. Por otro lado, la red hidrológica superficial extraída por el primer método, tiene una mayor definición, además de arrojar los resultados con representación vectorial, que es un modelo más apto para representar rasgos lineales, a diferencia del método de Hellweger (Arc/Info) que arrojó los resultados en forma de rejilla.

Comparando los resultados extraídos de los métodos anteriores con los propuestos por INEGI (1984; 1985), se puede decir que, la información de INEGI difiere primordialmente por la diferencia en escalas. A escalas mayores a 1:250,000 la generalización de la información no permite plasmar con detalle los rasgos, en particular, las cartas fisiográficas e hidrológicas estatales de INEGI, incluidas en la Síntesis Geográfica

de Baja California (1984), a escala de 1:1,000,000, son la única referencia previa. La hidrología superficial obtenida, se puede trabajar a escalas de 1:100,000, donde el detalle de los rasgos hidrológicos se conserva. Esta característica de la información hidrológica obtenida, es una de las aportaciones más importantes de este trabajo.

Rivertools es una herramienta orientada a estudios hidrológicos, que a diferencia de los dos métodos anteriores, realizó un análisis más minucioso sobre el MDT. Este programa, además de extraer una red hidrológica más densa, calcula otros índices hidrológicos como la densidad de drenaje, el orden Horton-Strahler de cada cuenca, perfiles del relieve a lo largo del cauce de algún arroyo y altura de descarga en las cuencas. Para el análisis de las cuencas, se tomó como unidades espaciales a las 22 cuencas obtenidas por el segundo método (Ehlschlaeger/GRASS), extrayendo del MDT el área correspondiente a cada una de las cuencas para su evaluación de manera independiente.

Con respecto a la clasificación Horton-Strahler, la cuenca con mayor importancia en la zona de estudio, es la cuenca 3 (Matomí), alcanzando el sexto orden, contribuyendo con sus escurrimientos a la recarga de los acuíferos para la parte norte de la franja costera. Sus descargas junto con las de las cuencas 2 (San Fermín) y 4 (Las Blancas) se encausan al arroyo Matomí, que es uno de los más importantes de la región, ya que, en esta zona se localizan los pozos de agua dulce que abastecen a las poblaciones aledañas a Puertecitos.

La densidad de drenaje, es un índice que está relacionado con el tipo de relieve, la litología y al tiempo al que ha estado expuesto a procesos erosivos fluviales. La Josefina es la cuenca con la densidad de drenaje más alta con un valor de 3.1 km^{-1} . Este valor no significa que sea la cuenca de mayor importancia para la región, ya que, su extensión es

menor en comparación con otras cuencas y sus escurrimientos no aporta grandes cantidades de agua al arroyo Las Arrastras donde descarga.

Las cuencas Matomí (3), San Fermín (2) y Las Blancas (4) que en su conjunto cubren una área de 525 km^2 y que representan el 15% de la zona de estudio, aportan sus escurrimientos al arroyo Matomí, contribuyendo a las recargas de los acuíferos en la planicie costera, donde se ubican los pozos que abastecen a los pobladores de la región. Estos pozos se localizan a una distancia de $\sim 15 \text{ km}$ al norte de la localidad de Puertecitos.

Al sur, las cuencas importantes son Mesa Prieta (17), San Luis Gonzaga (18), Valle Calamajué (19) y las Arrastras (21) cubriendo una extensión de 523 km^2 que representa el 15% del área en la zona de estudio, descargando sus escurrimientos al arroyo Santa María y a la planicie costera donde se localiza el pozo que abastece a los pobladores de San Luis Gonzaga, a 5 km al SE de la localidad Alfonsinas y alejado 1 km de la línea de costa. La cuenca Santa María (16) con un área de 132 km^2 , descarga sus escurrimientos al arroyo Alfredo que desemboca cerca de la localidad de Papá Fernández, al norte de San Luis Gonzaga.

Las cuencas Matomí (3) y San Luis Gonzaga (18), están constituidas principalmente de aluvión proveniente de las sierras limítrofes y ambas presentan un mismo valor de densidad de drenaje de 2.9 km^{-1} , aunque difieren en el área y en el número de tributarios. La cuenca Matomí tiene un área de 231 km^2 con un patrón de drenaje dendrítico constituido por 675 tributarios de los cuales 529 son de primer orden, mientras que la cuenca de San Luis Gonzaga tiene un área de 97 km^2 que es menos de la mitad y un sexto del número de tributarios con un total de 99 de los cuales 75 son del primer orden.

Una de las características de las cuencas en la zona de estudio asociadas a rocas graníticas o a sierras medias-bajas, es la formación de patrones dendríticos, que es el caso para las cuencas San Judas(15), Punta Final(20) y parte de Matomí(3), mientras que, para las cuencas con relieves abruptos que se conforman por rocas volcánicas, son propensas a formar patrones subdendríticos,. Cuencas con estas características son Santa María(18), El Placer(10) y El Volcán(13).

El tipo de drenaje que se presentan en cada cuenca, esta relacionado con el tipo y edad de la roca, la presencia de fallas y plegamientos. Para las cuencas de esta zona, conformadas de rocas graníticas, presentan un patrón de drenaje preferentemente dendrítico. Para las cuencas con rocas volcánicas, sus patrones dependerán de la edad de la roca, a rocas más jóvenes el patrón será subdendrítico, a rocas más viejas patrones dendríticos. La densidad de drenaje es un índice que nos refleja el tiempo al que la superficie ha estado expuesta al efecto erosivo, entre mayor el tiempo, mayor densidad. Cabe mencionar que las rocas volcánicas del plateau Matomí de ~3 Ma, las más jóvenes en la zona, presentan menor grado de erosión con un patrón de drenaje subdendrítico, donde la presencia de fallas es un factor que favorece a la formación de arroyos. Las cuencas Las Blancas(4), El Canelo(5), Los Hemes(6), Puertecitos(8) y Zamora(11) que en su mayoría abarcan el plateau, tienen densidades de drenaje bajas, en particular la Blancas con un valor de 0.5 km^{-1} .

Para las rocas sedimentarias, la formación del patrón de drenaje, dependerá mucho del paisaje a su alrededor, donde la presencia de escarpes fomentará el desarrollo de arroyos, canalizándose hacia un cauce principal.

VIII.- CONCLUSIONES

Este trabajo es un ejemplo de la gran utilidad que herramientas de cómputo en percepción remota y sistemas de información geográfica pueden tener en estudios de las geociencias, en este caso en particular, en aplicaciones de geomorfología e hidrología superficial. Los insumos fundamentales de este estudio fueron de una imagen satelitaria multiespectral y un modelo digital del terreno, que a su vez fueron fusionados para el enriquecimiento de la interpretación a través de estereopares sintéticos. Estos últimos presentan varias bondades en la interpretación, primero, el efecto estereoscópico que realza las geoformas en 3 dimensiones, segundo, éstos se pueden generar para extensiones grandes en escalas medias (1:100,000 a 1:500,000) proporcionando una visión sinóptica del territorio que por medios alternos son muy difíciles de lograr. Y tercero, se puede controlar la exageración vertical a las preferencias del intérprete así como la gran diversidad de texturas a aplicar en los modelos estereoscópicos, como diferentes combinaciones de bandas espectrales en los compuestos de falso color o incluso texturizando con cartografía temática.

La identificación de unidades geomorfológicas homogéneas para la franja costera entre Puertecitos y la bahía de San Luis Gonzaga, podrán ser la base cartográfica para proyectos de planeación regional en Baja California, en particular en los estudios de ordenamiento ecológico del corredor turístico entre estas dos localidades, que es la continuación hacia el sur del corredor turístico entre San Felipe y Puertecitos, que ya cuenta con un programa regional de desarrollo en el Gobierno del Estado.

En el análisis de las mesetas ubicadas en la provincia volcánica de Puertecitos, se cuantificó la orientación e inclinación de los bloques que las componen y se pudo evaluar como los planos formados por éstas, son normales a la orientación preponderante de las fallas de desplazamiento vertical estudiada por otros autores como Martín-Barajas *et. al* (1993,1995) y Stock (1989).

Para una mejor caracterización de la hidrología superficial de la zona de estudio, se combinaron los resultados obtenidos de los tres métodos aplicados aprovechando las bondades de cada método. Del método 1, se tomó la red hidrológica, ya que éste la almacena en formato vectorial, y es el modelo de datos más apto para representar rasgos lineales. Del segundo método, se tomó la delimitación de las 22 cuencas calculadas para la zona, que tienen una mayor segmentación hidrológica que el primer método que definió 9 cuencas. Y por último, del paquete Rivertools se tomó la clasificación Horton-Strahler para las 22 cuencas, así como los diversos índices hidrológicos que caracterizan con mayor detalle a cada una de las cuencas.

La información geomorfológica y de la hidrología superficial generada en esta tesis, es una aportación que permitirá tener un mayor conocimiento de los procesos geomorfológicos e hidrológicos que ocurren en esta franja costera del Golfo de California.

BIBLIOGRAFÍA

- Batson, R. M., Edwards, K., and Eliason, E. M. 1976. "Synthetic stereo and Landsat pictures". *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 42(10): 1279-1284 p.
- Berry, J. K. 1997. "Spatial reasoning for Effective GIS". GIS world books. Second. Colorado, USA. 208 p.
- Birkin, M., Clarke, G., Clarke, M., and Wilson, A. 1996. "Intelligent GIS localization decision and strategic planning". *Geoinformation International*. United Kingdom. 292 p.
- Bocco-Verdinelli, G. y Ortiz M. A. 1994. "Definición de unidades espaciales para el ordenamiento ecológico." *Jaina Boletín informativo EPOMEX*. 5(1): 8-9 p.
- Bonham-Carter, G. F. 1997. "Geographic Information Systems for Geoscientists". *Computer methods in the Geosciences*. Ottawa, Ontario, Canada. 398 p.
- Burrough, P. A. 1986. "Principles of geographical information system for land resources assessment". New York, Oxford University press. 190 p.
- Butler, R. D., and Stephen, J. W. 1998. "The application of remote sensing and geographic information system in the study of geomorphology": An introduction. *Geomorphology*. 21. special issue: 179-181 p.
- Cooke, R. U., and Doornkamp, J. C. 1990. "Geomorphology in Environmental Management": a new Introduction. Oxford University. Second edition. New York. 349 p.
- Demek, J. 1972. "Manual of detailed geomorphological mapping". in Prague, Commission on Geomorphological Survey and Mapping Prague, International Geological Union, 377 p.
- Dozier, J., and Strahler, A. H. 1983. "Ground investigations in support of remote sensing". In *manual of remote sensing*. American Society of Photogrametry (1): 1232 p.
- Ehlschlaeger, C. 1991. "The GRASS/Mathematical Link: Developing Hydrologic Models in Geographic Information Systems Interfaced with Computer Algebra Systems". U.S. Army Construction Engineering Research Lab.

- Ehschlaeger, C. 1989. "Using the AT search algorithm to develop hydrologic models from digital elevation data". Processing of international geographic information system (IGIS) symposium: Baltimore, MD, IGIS, p. 275-281 p.
- ER-Mapper. 1995. "Level One Training Workbook for Land Information Applications, in Earth Resource Mapping Pty. Ltd. , ed., Training Workbook, 322 p.
- ESRI .1997."Understanding GIS: The ARC/INFO Method". Environmental system research institute Inc. UK.
- Fletcher, J., Martín-Barajas A., Skerl, L. 1999. "Informe ejecutivo proyecto Estudio geológico estructural de la zona San Luis Gonzaga, Baja California". Ensenada, B.C., México, Ed. CICESE.
- Flood, M., and Guteluis, B. 1997. "Commercial implication of topographic napping using scanning airborne laser data". Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. 63 (4): 327-329 p.
- Gastil, R., Richard, P., and Allison, E. 1975. " Reconnaissance geology of the state of Baja California". The Geological Society of America ,special paper 43. Boulder, Colorado. 169 pp.
- GRASS. 1999. <http://www.baylor.edu/~grass/>.
- Hellweger, F. 1997. HEC-PREPRO: Austin. TX.,
<http://www.ce.utexas.edu/centers/crwr/reports/online.html>
- Henderson, F. M., and Xia, Zogn-Guo. 1997. "Sar applications un human sattlement detection, population estimation and urban land use pattern analysis: A status report". Geosciences and Remote Sensing. 35 (1): 79-85 p.
- Horn, B.K.P. 1981. "Hill Shading and Reflectance Map". Proceedings of the I.E.E.E. 69: 14 p.
- Horton, R.E. 1932. "Drainage basin characteristics". American Geophysical Union Transactions. 350-361 p.
- INEGI. 1982. "Carta estatal, Regionalización fisiográfica". México, D.F., INEGI.
- INEGI. Cartas topográficas h11b66, h11b67, h11b76, h11b77, h11b87, h11b88,h11d17, h11d18, h11d28, h11d29, h11d38, h11d39 . México. D.F. INEGI

- INEGI. 1984. "Síntesis geográfica de Baja California". México. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, 113 p.
- INEGI, 1995, "Estudio hidrológico del estado de Baja California": México. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, 180 p.
- Jensen, S. K. and J. O. Dominique. 1988. "Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis". *fotogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 54(11): 1593-1600 p.
- Joseph L., and David S. S. 1976. "Remote Sensing of Environment". Addison-Wesley Publishing Company, Inc. second edition, 694 p.
- Kowalik, W. S. 1993. "Artificial stereo remote sensing images in geologic interpretation". Environmental research institute of Michigan. Proceedings of the ninth thematic conference on geologic remote sensing. Volume I: Pasadena, California, USA, 41 p.
- Lewis, C. J. 1996. "Statigraphy and geochronology of Miocene and Pliocene volcanic rocks in the sierra San Fermín and southern sierra San Felipe, Baja California, Mexico". *Geofísica internacional* 35(1): 3-35 p.
- Longley, P., and Batty, M., 1996, *Spatial Analysis modeling in a GIS Environment*: New York, Geoinformation International, 1-392 p.
- López-Blanco, J. 1994. "The role of gis-user interactive process in the delineating boundaries of environmental units for land managing: an application in Baja California, México". *GIS/LIS*: 545-554 p.
- Llamas, J. 1989. "Hidrología General, Principios y aplicaciones". Universidad Autónoma del Estado de México. 626 p.
- Martín-Barajas, A. y Stock, J. M. 1993. "Estatigrafía y petrología de la secuencia volcánica de Puertecitos, noroeste de Baja California. Transición de un arco volcánico a rift", *Union Geofísica Mexicana*. 371 p.
- Martín-Barajas, A. ., Fletcher, J., Lopez-Martinez, M., and Mendoza-Borunda, R. 2000. "Warning Miocene subduction and arc volcanism in Baja California: The San Luis Gonzaga volcanic field." *Tectonophysics*, 318, 27-51 p.

- Martín-Barajas, A., Tellez-Duarte, M., and Stock, J. 1997. "Pliocene volcanogenetic sedimentation along an accommodation zone in northeastern Baja California: The Puertecitos Formation". Geological society of America (Special paper 318): 1-24 p.
- Martín-Barajas, A., Stock, J., Layer, P., Hausback, B., Renne, P., and López-Martínez, M. 1995. "Arc-rift transition volcanism in Puertecitos Volcanic Province northeastern Baja California, México". Geological Society of America. 107(4): 407-424 p.
- McDonnell, P. 1991. "Introduction to Map Projections". Landmark Enterprises. 199 p.
- Monne, J. L. P., Tena, M.V. L., Fabre, M. S., Cia, J. C., Andres, A. J., Corellano, F. P., Porta, J. C., Jíenez, J. M., Matías, M. H., Arnedo, M. T. E., and Mercen, C. S. 1997. "Cartografía geomorfológica básica y aplicada". Geoforma Ediciones Logroño. 227 p.
- Nagy, E. A., Grove M., and Stock J. M. 1999. "Age and stratigraphic relationships of pre- and syn-rift volcanic deposits in the northern Puertecitos Volcanic Province, Baja California, México". Journal of Volcanology and Geothermal Research. 93. 1-30 p.
- Noyola-Medrano, M.C., 1999, Aplicación de la percepción remota (Landsat TM) en la caracterización litológica de la franja costera entre Puertecitos y Bahía de San Luis Gonzaga: Ensenada, B.C., CICESE. 169 p.
- Richards, J.A. 1986. "Remote Sensing Digital Image Analysis". Springer-Verlag. 281 p.
- Sabins, F. 1987. "Remote Sensing Principles and interpretation". New York. W.H. Freeman. 447 P.
- Sanjuame, M. S., and Villanueva, R. J. B. 1996. "Teoría y Métodos en Geografía Física". Editorial Síntesis. Madrid. 303 p.
- Shapiro, M. and Westervelt J. 1992. "R.mapcalc an algebra for GIS and image processing". Champaign, Illinois, U.S. Army Construction Engineering Research Laboratory. 1-22 p.
- Snyder, J. P. 1984. "Map projections used by the U. S. Geological Survey". Washington, D.C. 313 p.

- Stock, J. M. 1989. "Sequence and geochronology of Miocene rocks adjacent to main gulf escarpment southern Valle Chico, Baja California". *Geofisica internacional*. 28(5): 851-898 p.
- Stock, J. M. and Hodges K. V. 1990. "Miocene to recent structural development of an extensional accommodation zone, northeastern Baja California, Mexico". *Journal of Structural Geology* 12(3): 315-328 p.
- Stock, J. M., Martin-Barajas A., Suarez-Vidal, F., and Miller M. 1991. "Miocene to Holocene extensional tectonics and volcanic stratigraphy on NE Baja California, Mexico". Geological society of America. Field trip . CICESE.
- Stock, J. M., Lewis, C. J., and Nagy, E. A. 1999. "The tuff of San Felipe: an extensive middle Miocene piroclastic flow deposit in Baja California, Mexico." *Journal of volcanology and geothermal research*. 93: 53-74.
- Strahler, A. N. 1964. "Quantitative geomorphology of drainage basins and channel networks". In Chown, V.T., ed.: New York, McGraw-hills, 39-76 p.
- Vincent, R.K. 1997. "Fundamentals of geological and environmental remote sensing". Prentice Hall. New Jersey. 370 p.
- Yang, X., Damen, M. C. J., and Zuidam, R. A. V. 1999. "Use of Thematic Mapper imagery with a geographic information system for geomorphologic mapping in a large deltaic lowland environment". *International Journal of Remote Sensing*. 20(4). 659-681 p.
- Yoeli, P. 1967. "The mechanization of analytical hill-shading". *The Cartographic Journal*. (2). 82-88 p.
- Zinck, J. A. 1989. "Physiography and Soils". International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences (I.T.C.) 156 p.

ANEXOS

Anexo 1

Información de la imagen de satélite Landsat TM (Thematic Mapper) que fue utilizada para la caracterización de la geomorfología.

Meta Data Details	
<u>Entity Id</u> :	LT5038039008720110
<u>Acquisition Date</u> :	1987/07/20
<u>Northwest Latitude</u> :	N31 09 40
<u>Northwest Longitude</u> :	W115 31 36
<u>Northeast Latitude</u> :	N30 53 02
<u>Northeast Longitude</u> :	W113 36 53
<u>Southeast Latitude</u> :	N29 24 02
<u>Southeast Longitude</u> :	W114 01 16
<u>Southwest Latitude</u> :	N29 40 25
<u>Southwest Longitude</u> :	W115 54 19
<u>Browse Availability</u> :	YES
<u>Date of Update</u> :	1996/11/04
<u>Center Nadir Latitude</u> :	N30 17 00
<u>Center Nadir Longitude</u> :	W114 46 00
<u>Satellite Number</u> :	LANDSAT 5
<u>Path</u> :	38
<u>Row</u> :	39
<u>WRS Type</u> :	Landsat 4,5
<u>Quality</u> :	Very Good
<u>Cloud Cover</u> :	1
<u>Quad 1 Cloud Cover</u> :	0
<u>Quad 2 Cloud Cover</u> :	0
<u>Quad 3 Cloud Cover</u> :	0
<u>Quad 4 Cloud Cover</u> :	0
<u>Full CCT Availability</u> :	YES
<u>Quad CCT Availability</u> :	Quad cct's are not available.
<u>Receiving Station</u> :	EROS Data Center, SD, USA
<u>Microframe</u> :	7903540517
<u>Recording Technique</u> :	TM Descending (Day).
<u>BW Film Availability</u> :	NO
<u>Condition</u> :	Scene not affected by a condition problem.
<u>Area Indicator</u> :	
<u>Product Distribution Site</u> :	10 years and older from EDC
<u>Sun Elevation</u> :	59
<u>Sun Azimuth</u> :	101
<u>Full Digi Quality</u> :	9 value full_digi_qlty
<u>TMACS Quality</u> :	~~~~~
<u>DCT Availability</u> :	Y DCT's are available
<u>Spacecraft Start Time</u> :	87201173601803
<u>Spacecraft Stop Time</u> :	87201173628494

Anexo 2

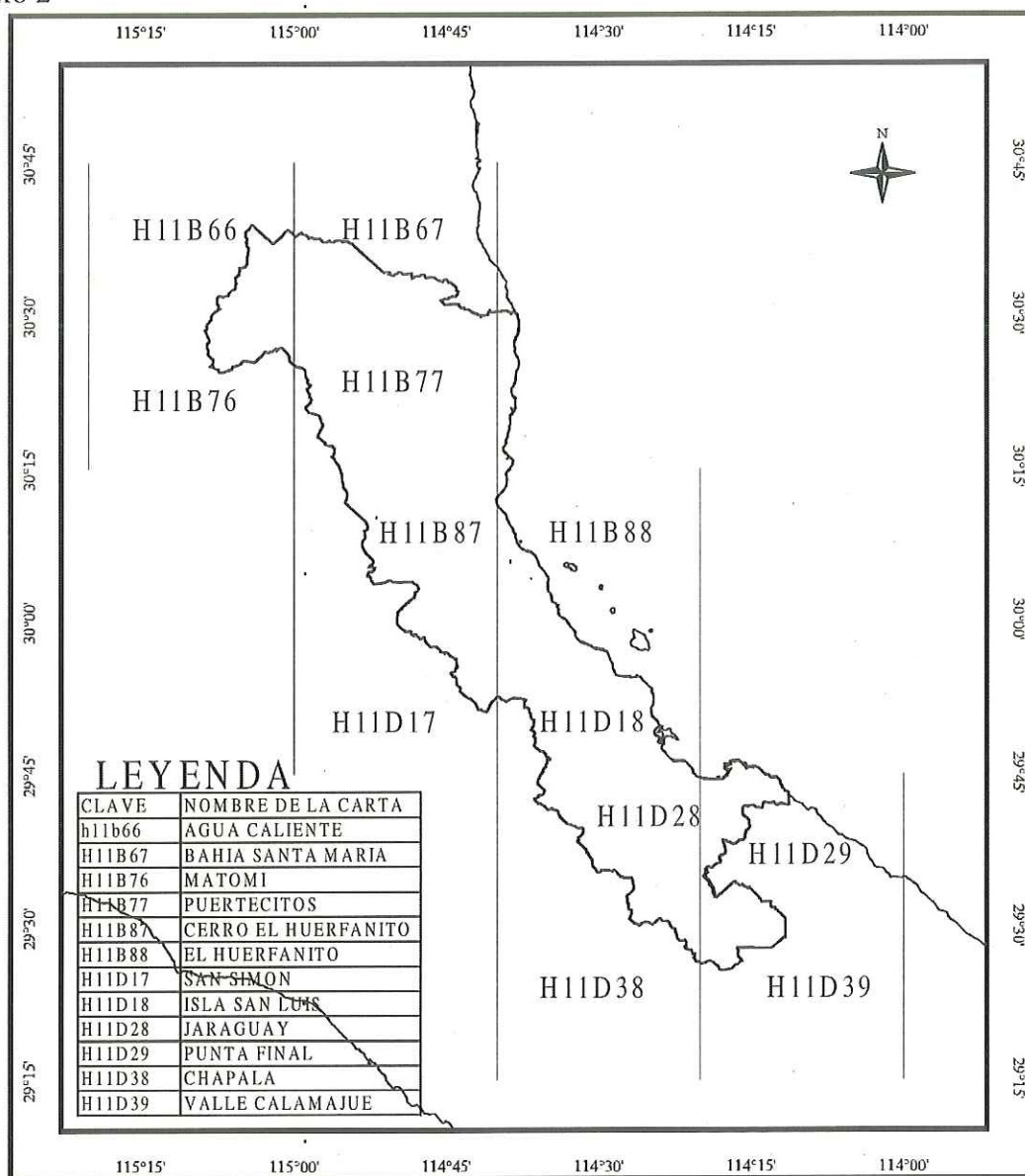


Figura donde se representa la cobertura geográfica de las cartas topográficas editadas por INEGI con sus claves y nombres.

Anexo 3

Tabla donde se muestran los puntos de control terrestre, con sus respectivos valores para las coordenadas UTM y en el sistema de referencia de la imagen TM

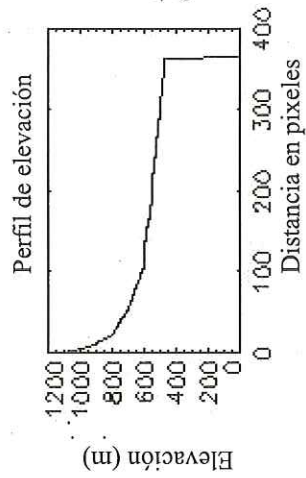
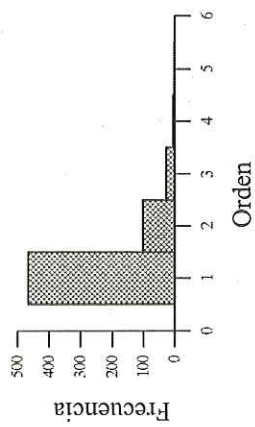
Definición de Puntos de Control Terrestres

Punto	Coordenadas de la imagen		Coordenadas del mapa topográfico	
	Celda X	Celda Y	Este	Norte
1	1371.059	5955.318	645330	3276900
2	4227.865	4630.629	731440	3302300
3	4829.644	5342.316	745400	3279750
4	4966.805	4558.025	752580	3301220
5	4740.138	4230.601	747580	3311430
6	4350.593	4065.271	737300	3317680
7	5062.814	5357.345	751960	3278280
8	4440.3	5593.683	733400	3274280
9	1892.032	5717.232	661000	3281450
10	3775.878	2647.509	727000	3360060
11	3126.515	2740.7	708260	3360180
12	2987.791	1885.746	708000	3384800
13	2434.783	1905.619	692300	3386620
14	2733.291	89.895	708240	3436560
15	2613.739	1476.067	699110	3398000
16	1721.281	355.769	678640	3433300
17	2063.757	672.047	686900	3422940
18	1988.539	1013.923	683380	3413650
19	1411.008	1085.061	666830	3414040
20	1132.216	2346.08	653700	3379640
21	117.713	4796.573	614800	3314780
22	618.674	5524.783	625840	3292160
23	582.292	4995.292	627120	3307200
24	5345.047	4731.858	762550	3294730
25	6317.368	5251.233	787740	3276060
26	4277.455	3625.708	737030	3330400
27	266.336	3328.486	625160	3355540
28	3047.487	574.76	715100	3421570
29	260.875	2281.921	629340	3385090
30	2091.805	2269.492	681090	3377750
31	2542.381	2880.771	691200	3358680
32	956.669	3641.007	643330	3343850
34	1942.798	4193.116	668800	3324170
35	2383.252	3460.095	684300	3342970
36	2856.274	4703.785	692480	3305940

Anexo 4

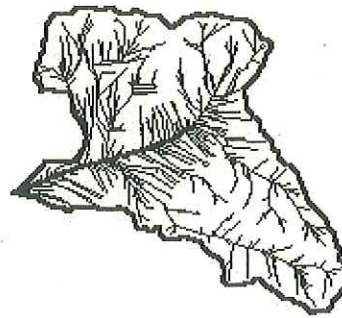
Clasificación de pendientes según Demek (1972), y su utilidad en base a la construcción

PENDIENTE	GEOFORMA	RIESGO	USO DE SUELO
0°-30° plano	áreas de inundación, canales, terrazas, áreas de cultivo	Cubiertas de agua ausentes	No tiene obstáculos para drenar, mejores condiciones para la construcción de áreas habitacionales.
0°30' -2° pendiente ligera	terrenos arenosos, terrazas llanas, regiones planas con semi-ondulaciones de los pies de monte, Pendientes suaves en las depresiones de los valles en la área de la cuenca	Región de relativos picos (ondulaciones) donde inician los procesos erosivos eólicos.	Arriba de 30" para la mecanización de las áreas agrícolas y forestales sin dificultad alguna. Limite entre las áreas urbanas y las vías de comunicación.
2-5° finamente inclinado. En algunas ocasiones se prolonga hasta los 7°	Colinas onduladas en regiones, pendientes de dunas. Pendientes altas en partes medias de montañas. Pie de los valles (inicio)	Movimientos masivos de varios tipos, procesos fluviales. Fuerte denudación. Inicio de formación de riachuelos.	Dificultad de transporte de vehículos en el terreno, fácil para vehículos de construcción
5-15° fuertemente inclinado	Valles suaves en las partes medias de las montañas y en la parte media del Pie de monte. Terrazas escalonadas.	Movimientos en masa de varios tipos, erosión fuerte/ erosión de riachuelos procesos intensivos de erosión linear también como suelos depositados en bosques bajos. Es necesario protección en tierras trabajadas.	Transporte: difícil para vehículos. Dificulta la construcción de carreteras.
15-35° inicio de escarpes		Denudación intensiva de varios tipos/ Erosión en bosques bajos.	Limite de las áreas de cultivo.
15-25° (escarpado)	Valles típicos de las montañas medias. Pendientes escarpadas en los pies de monte.	Erosión intensiva linear, destrucción de la cobertura de suelo. Fuerte erosión en las áreas boscosas.	Transportación: con vehículos especiales.
25-35° muy abrupto	Relativamente abrupto en la parte media de las montañas, montaña escarpada	Erosión intensiva linear en los campos, erosión peligrosa de los suelos	Limites extremos para vehículos catépillar.
35-55° precipicios	Pendientes cortadas de las montañas, pendientes escarpadas en acantilados.	Coberturas de escombros, afloran la roca madre con intensa denudación.	Mayormente cubierta por vegetación.
> 55° acantilados	Paredes expuestas.	Rocas: intensiva denudación.	Sin utilización económica.



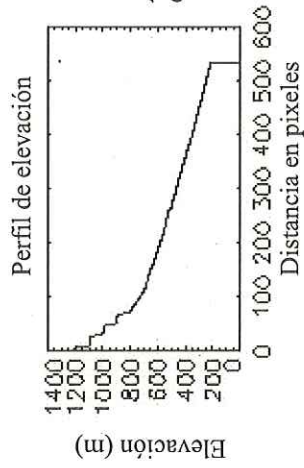
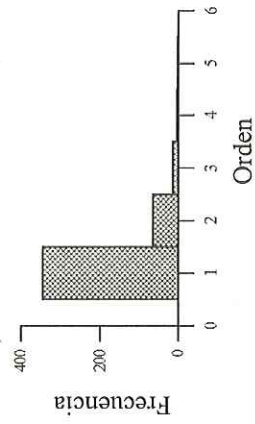
Altura de descarga
de la cuenca : 469 (m)

Perfil del arroyo : Parral
Patrón de drenaje: Dendrítico



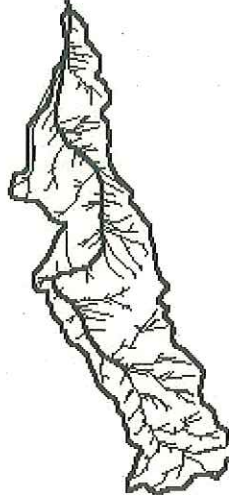
1) Parral

Clasificación de tributarios
 — Orden 1,2,3,4
 — Orden 5
 — Orden 6



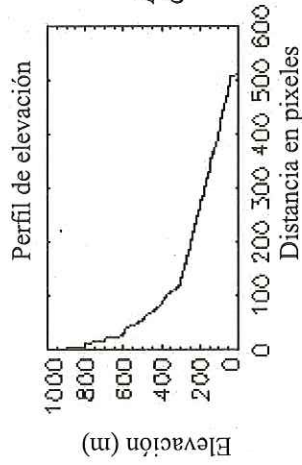
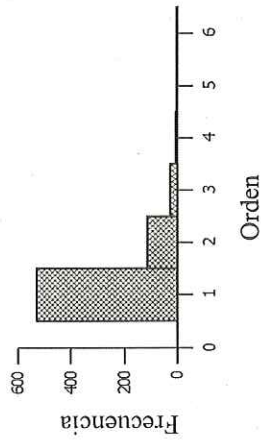
Altura de descarga
de la cuenca : 217 (m)

Perfil del arroyo : Matomí
Patrón de drenaje: Paralelo



2) San Fermín

Clasificación de tributarios
 — Orden 1,2,3,4
 — Orden 5
 — Orden 6



Altura de descarga
de la cuenca : 37 (m)

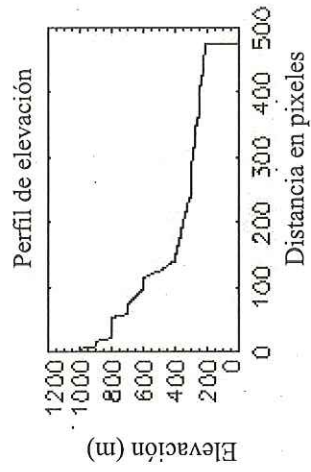
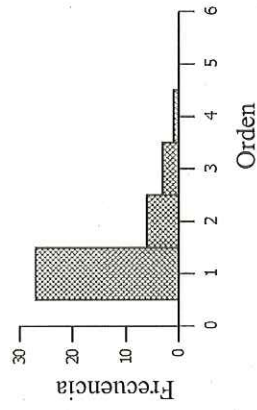
Perfil del arroyo : Afl. Matomí
Patrón de drenaje: Paralelo



3) Matomí

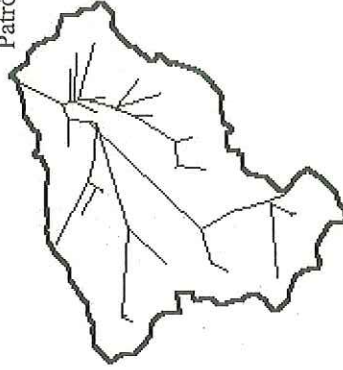
Clasificación de tributarios

- Orden 1,2,3,4
- Orden 5
- Orden 6



Altura de descarga
de la cuenca : 212 (m)

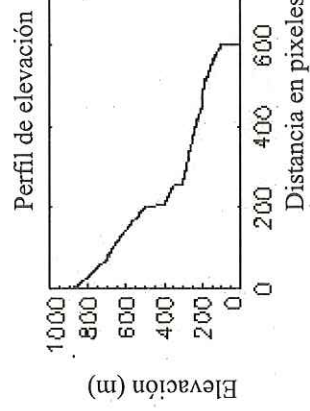
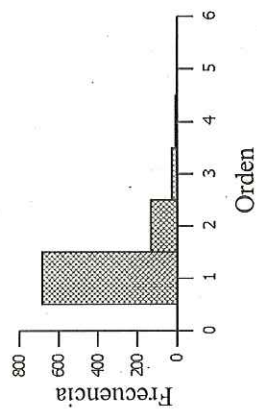
Perfil del arroyo : Las Blancas
Patrón de drenaje: Dendritico



4) Las Blancas

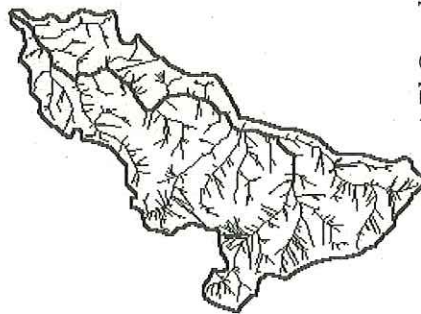
Clasificación de tributarios

- Orden 1,2,3,4
- Orden 5
- Orden 6



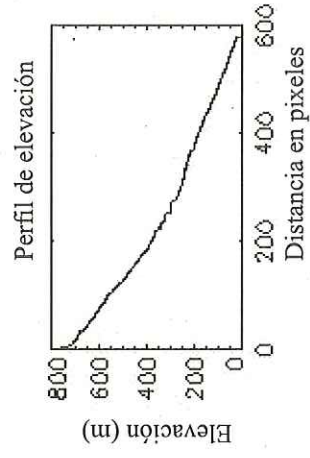
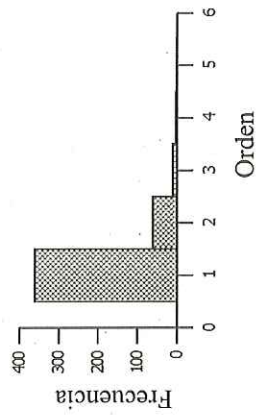
Altura de descarga
de la cuenca : 102 (m)

Perfil del arroyo : El Canelo
Patrón de drenaje: Subdendrítico



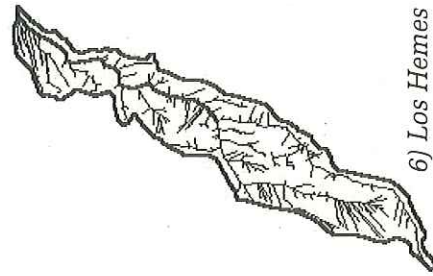
Clasificación de tributarios
— Orden 1,2,3,4
— Orden 5
— Orden 6

5) El Canelo



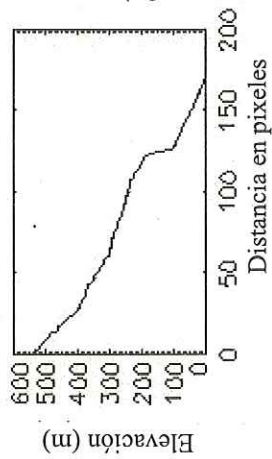
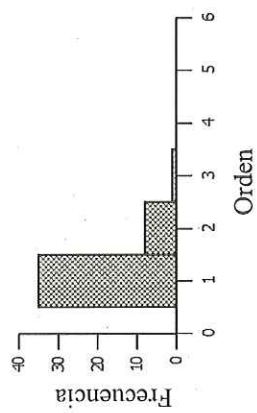
Altura de descarga
de la cuenca : 24 (m)

Perfil del arroyo : Los Hemes
Patrón de drenaje: Subdendrítico



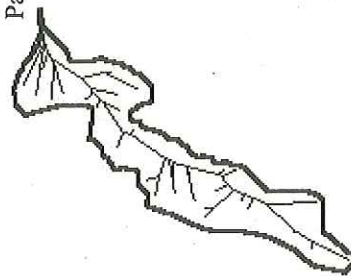
Clasificación de tributarios
— Orden 1,2,3,4
— Orden 5
— Orden 6

6) Los Hemes



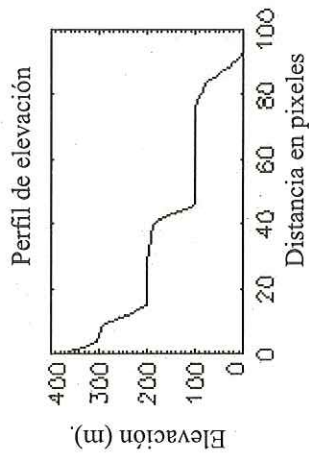
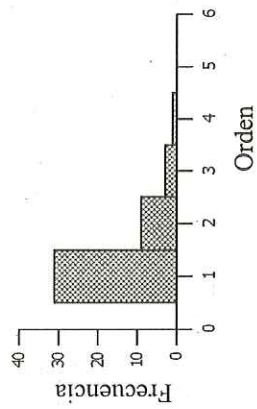
Altura de descarga
de la cuenca : 1 (m)

Perfil del arroyo : San Fermín
Patrón de drenaje: Dendrítico



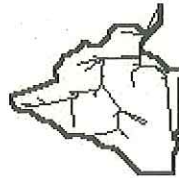
Clasificación de tributarios
— Orden 1,2,3,4
— Orden 5
— Orden 6

7) Punta San Fermín



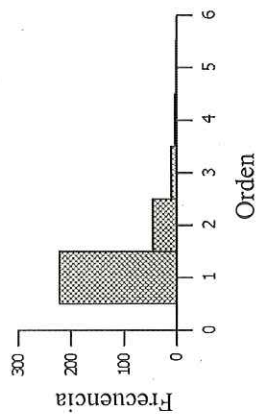
Altura de descarga
de la cuenca : 2 (m)

Perfil del arroyo : Puertecitos
Patrón de drenaje: Contorsionado
(retorcido)

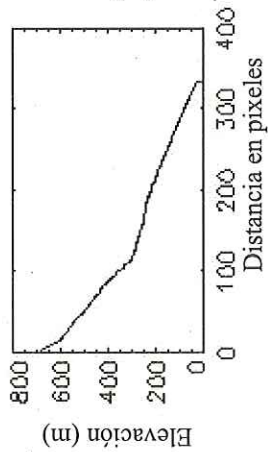


Clasificación de tributarios
— Orden 1,2,3,4
— Orden 5
— Orden 6

8) Puertecitos



Perfil de elevación



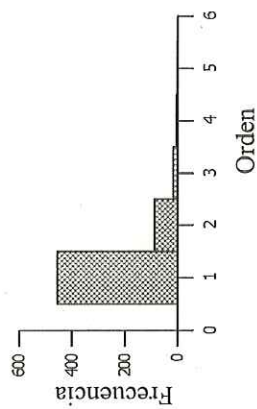
Altura de descarga
de la cuenca : 28 (m)

Perfil del arroyo : S/N (SSI)
Patrón de drenaje: Dendrítico

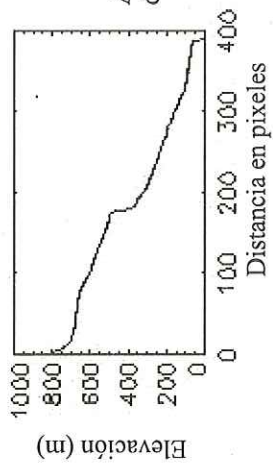


9) Santa Isabel

Clasificación de tributarios
 — Orden 1,2,3,4
 — Orden 5
 — Orden 6

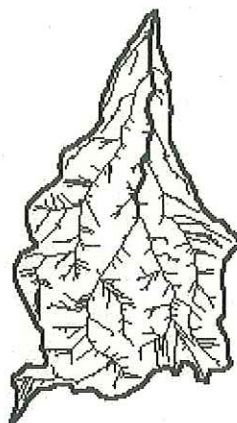


Perfil de elevación



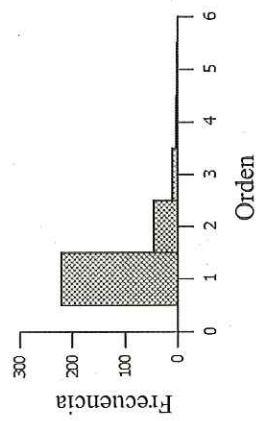
Altura de descarga
de la cuenca : 63 (m)

Perfil del arroyo : El huerfanito
Patrón de drenaje: Subdendrítico

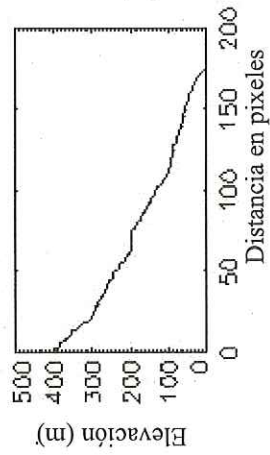


10) El Placer

Clasificación de tributarios
 — Orden 1,2,3,4
 — Orden 5
 — Orden 6



Perfil de elevación



Altura de descarga
de la cuenca : 1 (m)

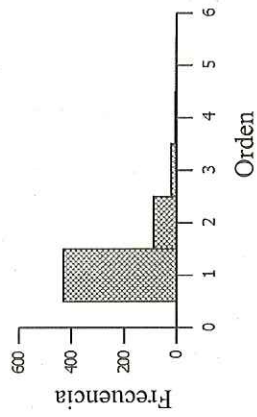
Perfil del arroyo : El Placer

Patrón de drenaje: Contorsionado
(Retorcido)

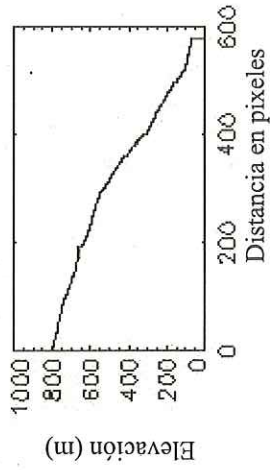


11) El Huerfanito

Clasificación de tributarios
 - Orden 1,2,3,4
 - Orden 5
 - Orden 6



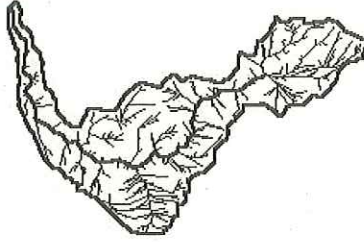
Perfil de elevación



Altura de descarga
de la cuenca : 68 (m)

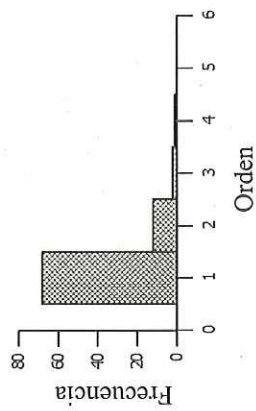
Perfil del arroyo : Zamora

Patrón de drenaje: Dendrítico



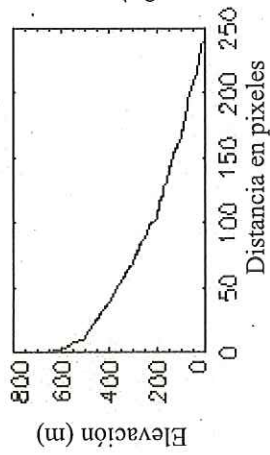
12) Zamora

Clasificación de tributarios
 - Orden 1,2,3,4
 - Orden 5
 - Orden 6



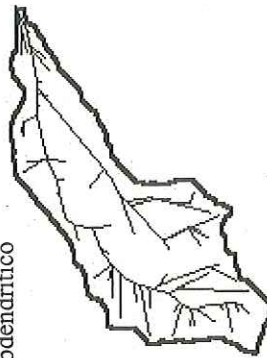
Orden

Perfil de elevación



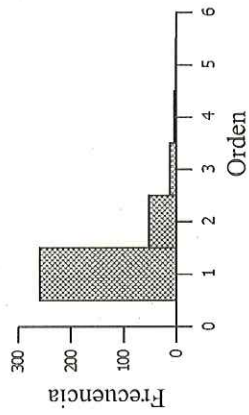
Altura de descarga
de la cuenca : 26 (m)

Perfil del arroyo : S/N (El Volcán)
Patrón de drenaje: Subdendrítico



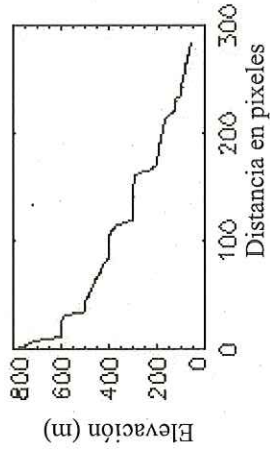
Clasificación de tributarios
 — Orden 1,2,3,4
 — Orden 5
 — Orden 6

13) El Volcán



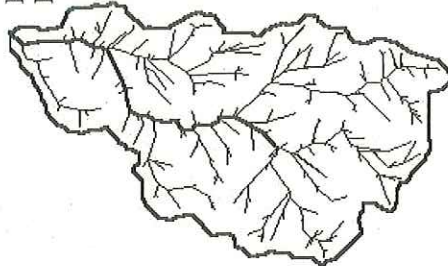
Orden

Perfil de elevación



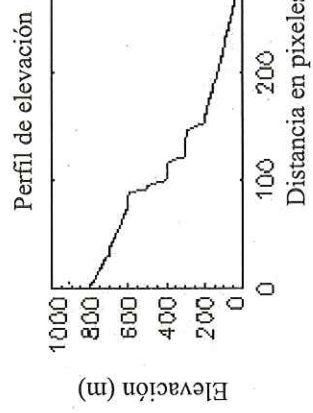
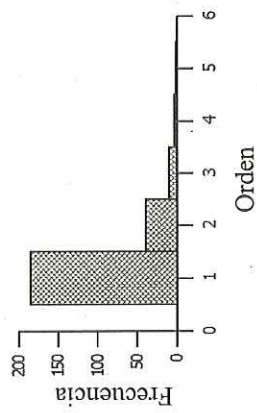
Altura de descarga
de la cuenca : 60 (m)

Perfil del arroyo : Afl. Zamora
Patrón de drenaje: Subdendrítico



Clasificación de tributarios
 — Orden 1,2,3,4
 — Orden 5
 — Orden 6

14) La Olvidada



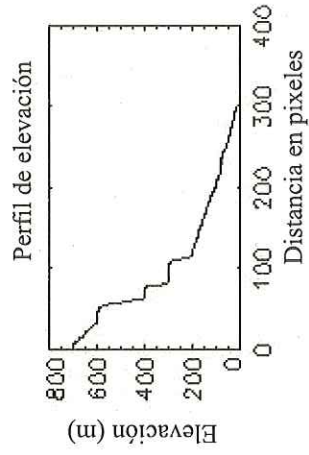
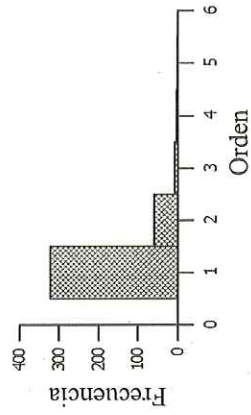
Altura de descarga
de la cuenca : 1 (m)

Perfil del arroyo : Mal de orín
Patrón de drenaje: Subdendrítico



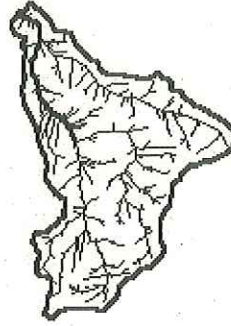
15) San Judas

Clasificación de tributarios
 — Orden 1,2,3,4
 — Orden 5
 — Orden 6



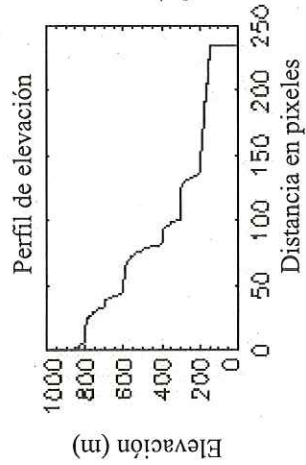
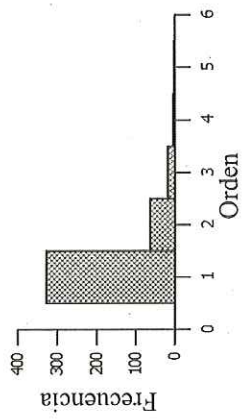
Altura de descarga
de la cuenca : 12 (m)

Perfil del arroyo : Santa María
Patrón de drenaje: Dendrítico



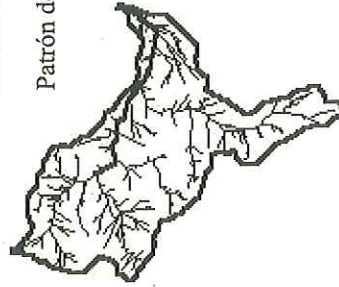
16) Santa María

Clasificación de tributarios
 — Orden 1,2,3,4
 — Orden 5
 — Orden 6



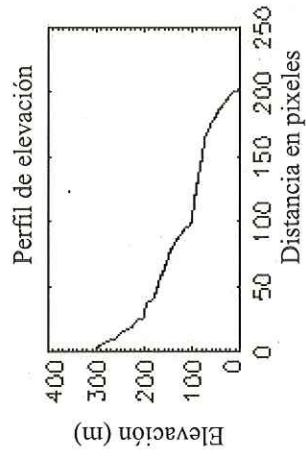
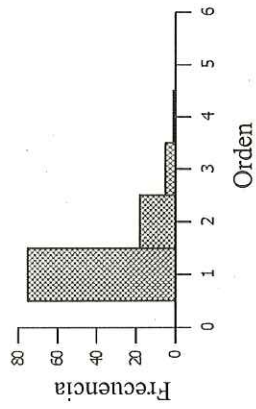
Altura de descarga
de la cuenca : 148 (m)

Perfil del arroyo : S/N Afl.
Santa María
Patrón de drenaje: Subdendrítrico



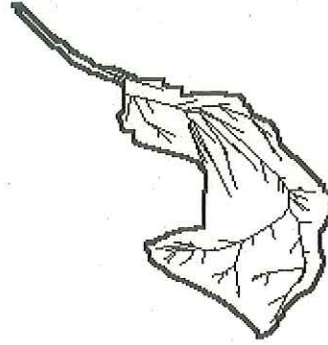
Clasificación de tributarios
Orden 1,2,3,4
Orden 5
Orden 6

17) Mesa Prieta



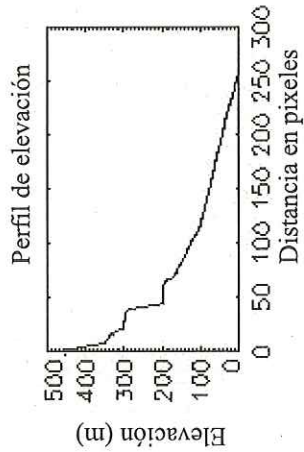
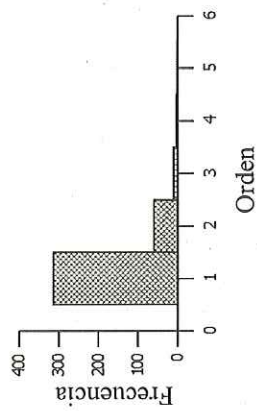
Altura de descarga
de la cuenca : 1 (m)

Perfil del arroyo : S/N Afl.
Santa María
Patrón de drenaje: Dendrítrico



Clasificación de tributarios
Orden 1,2,3,4
Orden 5
Orden 6

18) San Luis Gonzaga

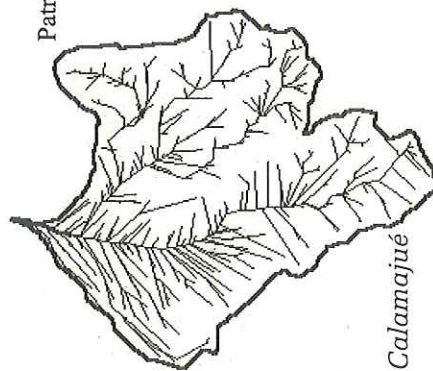


Altura de descarga
de la cuenca : 1 (m)

Perfil del arroyo : S/N

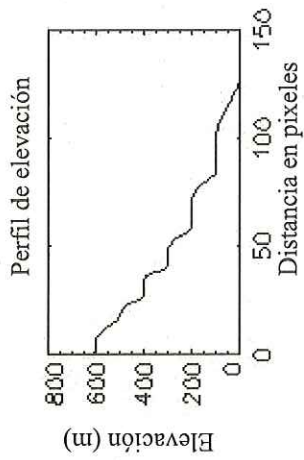
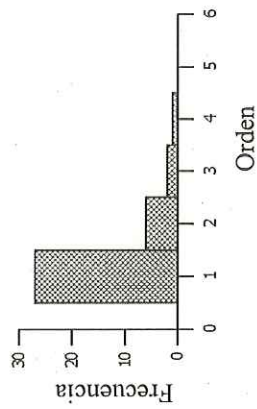
Punta final

Patrón de drenaje: Subdendrítico



19) Valle Calamajue

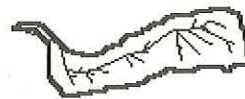
Clasificación de tributarios
 — Orden 1,2,3,4
 — Orden 5
 — Orden 6



Altura de descarga
de la cuenca : 1 (m)

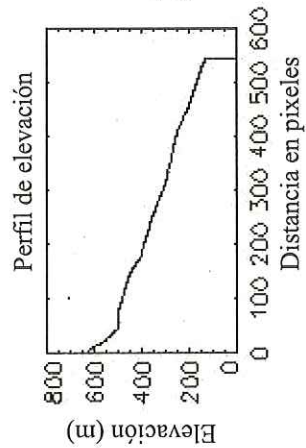
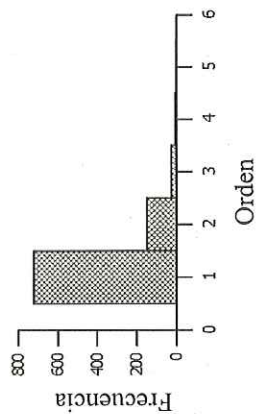
Perfil del arroyo : Calamajue

Patrón de drenaje: Dendrítico



Clasificación de tributarios
 — Orden 1,2,3,4
 — Orden 5
 — Orden 6

20) Punta final



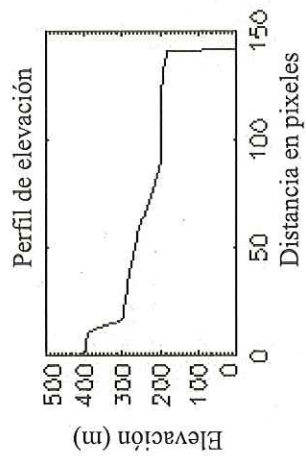
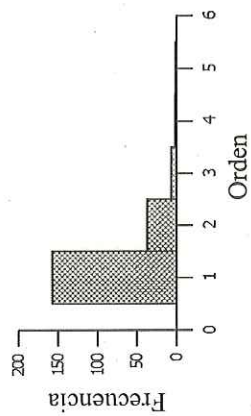
Altura de descarga
de la cuenca : 131 (m)

Perfil del arroyo : Las Arrastras
Patrón de drenaje: Dendrítico



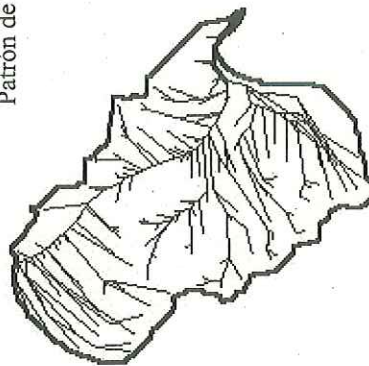
21) Las Arrastras

Clasificación de tributarios
— Orden 1,2,3,4
— Orden 5
— Orden 6



Altura de descarga
de la cuenca : 181 (m)

Perfil del arroyo : S/N Afl.
Calamajue
Patrón de drenaje: Subdendrítico



22) La Josefina

Clasificación de tributarios
— Orden 1,2,3,4
— Orden 5
— Orden 6