

Valoración Hidrosocial

En la Reserva de la Biósfera
del Vizcaíno, BCS.; México

LUIS F. BELTRÁN MORALES

SAUL CHÁVEZ LÓPEZ

ALFREDO ORTEGA RUBIO

EDITORES



**VALORACIÓN HIDROSOCIAL EN LA RESERVA DE
LA BIOSFERA DEL VIZCAÍNO, BCS. MÉXICO**

VALORACIÓN HIDROSOCIAL EN LA RESERVA DE LA BIOSFERA DEL VIZCAÍNO, BCS. MÉXICO

**Luis F. Beltrán Morales
Saúl Chávez López
Alfredo Ortega Rubio
Editores**

**CENTRO DE INVESTIGACIONES BIOLÓGICAS DEL
NOROESTE, S.C.**

México 2010

IV

Primera Edición: Enero de 2010

D.R.© Publicación de divulgación del Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C. Mar Bermejo N.195, Col. Playa Palo de Santa Rita. La Paz, Baja California Sur, México, 23090.

El contenido de los capítulos es responsabilidad de los autores

La presentación y disposición en conjunto de **Valoración hidrosocial en la Reserva de la Biosfera del Vizcaíno, BCS.; México** son propiedad del editor. Ninguna parte de esta obra puede ser reproducida o transmitida, mediante ningún sistema o método electrónico, mecánico (incluyendo fotocopiado, la grabación o cualquier sistema de recuperación y almacenamiento de información), sin consentimiento por escrito del editor.

Un agradecimiento especial a L.A.E. Tania Flores Azcárrega por su contribución para la integración de cada uno de los capítulos de este documento.

Responsables de Edición:

Luis F. Beltrán Morales

Saúl Chávez López

Alfredo Ortega Rubio

Tania Flores Azcárrega

Portada y Edición interior:

Gerardo Rafael Hernández García

HC140.E5 D48 2010

Valoración hidrosocial en la Reserva de la Biosfera del Vizcaíno, BCS.; México / editado por Luis Felipe Beltrán Morales, Saúl Chávez López y Alfredo Ortega Rubio. Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C. 2009.

227 p.: il. ; 23 cm.

1. Desarrollo Regional--México

I. Beltrán Morales, Luis Felipe, Saúl Chávez López y Alfredo Ortega Rubio.

Impreso en México

Printed in México

Editores

LUIS F. BELTRAN MORALES. Doctor en Ciencias Ambientales por el Centro Europa-Latinoamérica de la Universidad de Concepción, Chile (EULA), Miembro del Sistema Nacional de Investigadores Nivel II. Investigador Titular del Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S. C., Profesor de la Maestría en Economía del Medio Ambiente y Recursos Naturales de la UABCS y del Posgrado en Uso, Preservación y Manejo de Recursos Naturales del CIBNOR, S.C. Líneas de Investigación: Economía de Recursos Naturales y Desarrollo Sustentable. Actualmente es Coordinador de Vinculación, Servicios y Transferencia de Investigación del Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S. C. (CIBNOR, S.C.). E-mail: lbeltran04@cibnor.mx

ALFREDO ORTEGA RUBIO. Doctor en Ciencias con especialidad en Ecología por el Instituto Politécnico Nacional (IPN). Investigador Titular E del Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, CIBNOR, S.C. Ha sido galardonado con dos Premios Nacionales: Reconocimiento a la Conservación de la Naturaleza 2003, en la Categoría Académica y de Investigación. Reconocimiento del Gobierno de la República Mexicana específicamente por la trayectoria y calidad de sus trabajos de investigación en materia de Conservación de la Naturaleza Mexicana, incluyendo las Áreas Naturales Protegidas, las Regiones Prioritarias para la Conservación y sus zonas de influencia. Asimismo, ha sido galardonado con el Premio Nacional al Mérito Nacional Forestal y de la Vida Silvestre 1993, por la calidad de sus trabajos de investigación en vida silvestre. Miembro del Sistema Nacional de Investigadores Nivel III. Líneas de investigación: Ecología aplicada en la conservación, uso racional y manejo sustentable de recursos naturales renovables. E-mail: aortega@cibnor.mx

SAUL CHAVEZ LOPEZ. Doctor en Ciencias del Mar por la Universidad Politécnica de Cataluña, España. Profesor invitado en el programa de postgrado de Ciencias Marinas y Costeras de la Universidad Autónoma de Baja California Sur y en la Facultad de Ciencias Marinas de la Universidad de Colima. Colaboración en el Grupo de Impacto Ambiental del CIBNOR, S. C., de 1992 al 2009 en 36 estudios ambientales entre los que destacan el Plan de Manejo (1992) y el Ordenamiento Ecológico (2003) de la Reserva de la Biosfera del Vizcaíno B. C. S. Líneas de Investigación: hidrodinámica y modelado costero; Geología Estructural e Hidrología Subterránea. Actualmente Investigador Asociado en el Programa de Planeación y Conservación Ambiental del Centro de Investigaciones Biológicas Noroeste, S. C. E-mail: schavez04@cibnor.mx

Índice

Presentación

Sergio Hernández Vázquez | 1

Introducción

Luis F. Beltrán Morales, Saúl Chávez López, Alfredo Ortega Rubio. | 3

CAPÍTULO I

Geomorfología de las Cuencas Hidrográficas y Calidad de Agua de la Reserva de la Biosfera de El Vizcaíno, B. C. S.

Saúl Chávez López | 7

CAPÍTULO II

Hidrología de la Reserva de la Biosfera de el Vizcaíno, B. C. S.

Saúl Chávez-López | 35

CAPÍTULO III

Calidad de Agua en la Reserva de la biosfera de el Vizcaíno, B. C. S.

Saúl Chávez-López | 53

CAPÍTULO IV

Organismo Regulador del Recurso Agua en la Reserva de la Biosfera del Vizcaino, B.C.S. México.

Luis F. Beltrán Morales, Magdalena Lagunas Vázquez, José Antonio Beltrán Morales, Tania Flores Azcárrega, Martín Martínez Salvador | 77

CAPÍTULO V

Estructura Tarifaria del Recurso Agua en la Reserva de la Biosfera del Vizcaino, B.C.S. México

Luis F. Beltrán Morales, Marco A. Almendarez Hernández, Gerzaín Avilés Polanco, Lizbeth Salgado Beltrán, Enrique Troyo Diéguez | 99

CAPÍTULO VI

Volumenes de Consumo de Agua por Localidad en la Reserva de la Biosfera del Vizcaino, B.C.S. México

Luis F. Beltrán Morales, José Borges Contreras, Magdalena Lagunas Vázquez, José Antonio Beltrán Morales, Felipe García Rodríguez | 113

CAPÍTULO VII

Eficiencia Económica en el Contexto de la Provisión de Agua Bajo Precios Com-

VIII

petitivos y de Monopolio. Un Análisis Teórico para las Comunidades Costeras de la Reserva de la Biosfera El Vizcaíno, B.C.S. México

Marco A. Almendarez Hernández, Luis Armando Jaramillo-Mosqueira,
Luis Felipe Beltrán Morales, Gerzaín Avilés Polanco | 129

CAPÍTULO VIII

Destilación solar de agua de mar: una alternativa de ecodesarrollo para la Reserva de la Biosfera El Vizcaíno, B.C.S. México

Miguel A. Porta Gandara, Joaquín Gutierrez Jaguey | 153

CAPÍTULO IX

Mercados de Derecho de Agua: Una opción de ecodesarrollo en la Reserva de la Biósfera del Vizcaíno, B.C.S.

Fidel Cota Verdugo, Félix Alfredo Beltrán Morales, Tania Flores Azcárrega,
Luis F. Beltrán Morales, Alfredo Ortega Rubio | 173

Conclusiones Generales

Luis F. Beltrán Morales, Saúl Chávez López, Alfredo Ortega Rubio. | 201

Autores | 203

Referencias | 207

Presentación

Indudablemente a nivel planetario uno de los desafíos estratégicos de nuestra generación es la búsqueda de las soluciones óptimas que nos permitan un eficiente manejo del recurso natural agua. Las soluciones a los acuciantes problemas de manejo de los recursos hídricos, tienen que ver no solo con el uso propiamente del agua de una región, sino también con las acciones y decisiones que se toman en el uso de las tierras circundantes, a nivel de las cuencas.

Prácticamente toda la decisión de cambio de uso de suelo, de ordenamiento territorial y ecológico, y de desarrollo urbano, industrial o agropecuario, conllevan cambios que afectan tanto la cantidad como la calidad del agua superficial y subterránea. A su vez tales cambios repercuten en las potencialidades de utilización actual y futura que puede soportar una cuenca hidrológica, y sus recursos hidráulicos.

En este contexto, todo nuevo desarrollo, o cambio en decisiones de manejo altera en mayor o menor medida, la estructura y funcionalidad de los sistemas ecológicos circundantes y por ende en los procesos hidrológicos de los sistemas naturales, alterando los servicios ecológicos que prestan, tales como la captación de agua pluvial. Si a todo ello le aunamos el que toda decisión de cambio en patrones de uso de suelo, están a su vez determinadas por motivaciones de índole económica, las cuales a su vez dependen del entramado de condiciones sociales, tenemos entonces que un estudio de valoración hidrosocial es necesariamente un estudio interdisciplinario.

Precisamente la obra que tiene en estos momentos Usted en sus manos ha sido conceptualizada y desarrollada con un enfoque interdisciplinario, incluyendo en el análisis aproximaciones geomorfológicas, hidrológicas, jurídicas, sociales y económicas.

El resultado de este interdisciplinario esfuerzo ha redundado en el planteamiento estratégico de una Gestión Integral del recurso Agua, con prácticas recomendaciones tales como la implementación de instrumentos económicos, como la valoración, para solucionar los conflictos de administración del agua, precisamente en el Área Natural Protegida de mayor extensión y de mayor aridez de nuestro Estado de Baja California Sur y una de las más áridas y extensas de nuestra Republica Mexicana.

Por la importancia estratégica del tema Agua, por la importancia de esta Área Natural Protegida y por la aproximación interdisciplinaria con la que se ha desarrollado, esta obra indudablemente será de interés y utilidad tanto para aquellos que desean profundizar en el conocimiento de estas temáticas, como para aquellos que tienen en sus manos la toma de decisiones en esta Región.

Dr. Sergio Hernández Vázquez
Director General CIBNOR

CAPÍTULO I

Geomorfología y Geología de la Reserva de la Biosfera de el Vizcaíno, B. C. S.

Saúl Chávez-López¹

I.1. Clima

La Reserva de la Biosfera de El Vizcaíno, así como el resto del estado y los estados que integran la mitad norte del país corresponde a una región árida con déficit de precipitaciones, en donde además la situación geográfica, fisiografía, y la influencia marítima que recibe hacia la costa del Pacífico con la corriente oceánica fría de California y hacia la costa oriental la influencia del Golfo de California, considerado como cuenca de evaporación, con aguas templadas, influyen en la distribución y variación climática (temperatura, precipitación y evaporación), generando diferencias climáticas locales, que según INEGI (1996), y de acuerdo con la clasificación de Köppen, modificada por Enriqueta García (1973), para la región de la Reserva es posible diferenciar tres tipos de clima que corresponden a:

1) Sierra de la Giganta (Sierras altas, Fig. 2), clima seco, templado con temperatura media anual entre 18° y 16° C, media mensual más alta en julio con 28.6° C y el mes mas frío en enero entre 12 a 18° C. Precipitación total anual menor a los 300 mm, la precipitación más alta se presenta en los meses de agosto y septiembre con medias mensuales próximos a los 50 mm, y mínimas registradas de abril a mayo con medias menores a 1 mm.

2) Clima muy seco semicalido, se presenta en la zona geomorfológica de bajada, y corresponde a la zona de transición entre las unidades geomorfológicas de sierras altas y la llanura del Vizcaíno, con temperatura media anual de 18° a 22° C, las temperaturas medias mensuales más elevadas se presentan en agosto y septiembre de 29° a 35° C, mientras que el mes más frío es enero, con media mensual entre 8 y 10° C. La precipitación total anual se

¹ Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S. C., Programa de Planeación Ambiental y Conservación.

encuentra entre los 100 y 200 mm, los meses de mayor precipitación son agosto y septiembre con promedio de 50 a 60 mm respectivamente y los de menor precipitación son abril, mayo y junio con apenas unas décimas de milímetros.

3) Clima muy seco muy calido, se presenta en la mayor parte de la llanura del Vizcaíno y en las franjas costeras del Pacífico y Golfo de California (Fig. 2). La temperatura media anual oscila entre 22 y 24° C, la media mensual más alta es de entre 27 a 30° C y se presenta en los meses de agosto y septiembre; el mes más frío es enero con 17° C. La precipitación media anual es de 110 mm, la más alta se presenta en los meses de agosto y septiembre con medias de 45 a 49 mm, y las mínimas se registran en abril, mayo y junio con medias inferiores a los 4 mm.

Según la CNA (2002), en la cuenca 302 Vizcaíno (Fig. 3 del Capítulo II), la temperatura mínima se presenta durante los meses de noviembre a enero de 0 a 2° C, y la máxima durante los meses de junio a agosto de 40 a 42° C. La misma fuente reporta datos de precipitación de estaciones climatológicas ubicadas en la cuenca, para el periodo de 1958 a 1973, los cuales se muestran en la tabla 1, menciona que la precipitación media anual es de 97.21 mm, la media mensual de 8.12 mm y los meses de septiembre a diciembre como los de mayor precipitación con 20 mm. De igual forma señala que en las estaciones las Lagunas, Guadalupe y Vizcaíno ubicadas en la unidad geomorfológica de llanura, se registraron las menores precipitaciones, mientras que las restantes estaciones ubicadas en partes altas de la cuenca registraron mayor precipitación, siendo el de la estación Santa Gertrudis el más alto con 151 mm. En cuanto a la evaporación potencial se estima en 2000 mm/año, presentándose durante los meses de julio y agosto su valor máximo y durante diciembre y enero el mínimo.

Tabla 1. Datos de precipitación en las estaciones climatológicas en la cuenca del Vizcaíno para el periodo comprendido de 1958 a 1973 (CNA, 2002).

Estación	Superficie (km ²)	Precipitación (mm)	%	Precipitación ponderada
Bahía Tortugas	748.04	93.14	5.50	5.12
El Arco	1987.88	137.04	14.62	20.04
Las Lagunas	3731.10	56.04	27.45	15.33
El Tablón	1063.40	123.26	7.82	9.54
Guadalupe	682.47	84.97	5.02	4.27
Santa Gertrudis	1449.02	150.98	10.66	15.10
Punta Abreojos	437.178	104.53	3.22	3.37
Vizcaíno	3496.08	90.59	25.71	23.29
	13.595.97		100.00	97.21

Por su parte CFE (1991), en el informe de la exploración geotérmica de la zona de Las Tres Vírgenes (porción sureste de la Reserva, unidad geomorfológica de sierras altas), reporta datos de precipitación, de cuatro estaciones climatológicas que corresponden a: Santa Rosalía, San Ignacio, La Palma (actualmente fuera de servicio) y El Mezquital, con periodos de tiempo de: 1941-1970, 1959-1984, 1955-1967 y 1979-1986, respectivamente, para la estación Santa Rosalía CFE (1991), refiere otro periodo de datos de precipitación de 1960 a 1984, los cuales se resumen en la tabla 2.

La misma fuente refiere para la estación Santa Rosalía una disminución histórica de precipitación para los periodos de tiempo analizados con un 32%, sin embargo los meses con mayor probabilidad de lluvia y muy similares al resto de las estaciones de la tabla 2 se mantienen, en los meses de agosto, septiembre y los meses sin lluvia o muy escasa de abril a junio. De igual forma menciona que las variaciones en el régimen pluvial suelen ser muy altas de uno a otro año, ya que en los periodos de tiempo analizados para todas las estaciones se presentan años sin lluvia o con precipitaciones ínfimas, mientras que en otros años el promedio de precipitación supera el promedio de los periodos de tiempo analizados, como en el caso de la estación Santa Rosalía, que para 1970, 71 y 75 se reporta sin lluvia mientras que para 1967 y 1983 se reportan 370 mm y 200 mm de lluvia respectivamente; Para la estación San Ignacio en 1964, 65 y 70 no hubo precipitación mientras que en 1967, 78, 81 y 83 la precipitación supero los 200 mm. En la estación La Palma para el periodo analizado se registran lluvias pero se observan variaciones importantes con precipitaciones menores a 50 mm en los años de 1955 y 1966 y precipitaciones superiores a los 200mm en 1958, 59 y 62.

Tabla 2. Datos de precipitación en las estaciones climatológicas de la zona aledaña a Las Tres Vírgenes (CFE, 1991).

Estación	P. media mensual (mm)	P. media anual (mm)
Santa Rosalía (1941-1970)	10.1	121
(1960-1984)	6.8	81.8
San Ignacio (1959-1984)	8.85	106.6
La Palma (1955-1967) (fuera de servicio)	9.1	109.1
El Mezquital (1979-1986)	6.1	73.1

De manera generalizada podemos referir que el clima en la región noreste del país se encuentra regido en gran medida por el sistema de alta presión semipermanente del Pacífico nororiental y la influencia de la celda de alta presión de las Bermudas-Azores, que proporcionan lluvia durante los meses invernales, así como los sistemas nubosos convectivos verticales que llegan

a precipitar grandes volúmenes de agua durante los meses de verano y otoño, llegando a convertirse en perturbaciones atmosféricas denominadas chubascos (INEGI, 1996).

La escasa precipitación en la región de la Reserva de la Biosfera de El Vizcaíno se refleja en la inexistencia de corrientes de agua superficiales, por lo que el agua del subsuelo adquiere más importancia debido a la creciente demanda en el sector urbano y agrícola y cuya creciente extracción hace necesario un mejor conocimiento de su distribución subterránea.

I.2. Fisiografía y geomorfología

La Reserva de la Biosfera de El Vizcaíno, se encuentra en la porción media de la estructura peninsular que Raisz (1964), denomina como Provincia Fisiográfica de Baja California, la cual se extiende aproximadamente 1300 km desde la frontera con los Estados Unidos de Norteamérica hasta Cabo San Lucas, con orientación NW-SE, limitada al este por el Golfo de California y al oeste por el Océano Pacífico. En este marco regional, el área que abarca la Reserva se encuentra compuesta por los aspectos geomorfológicos de las Subprovincias Fisiográficas, a) Sierra de La Giganta, la cual Alvarez (1962), denomina como Provincia Sierras de Baja California y b) Desierto de San Sebastián Vizcaíno, también conocida como Tierras Bajas o Discontinuidad Desierto de San Sebastián Vizcaíno (INEGI, 1996; Raisz, 1964), Por su parte Alvarez (1962), refiere esta unidad como parte de la provincia fisiográfica Llanura Costera de Baja California (Fig. 1).

La geomorfología y topografía de la subprovincia Sierra de La Giganta, se define como sierras altas, con elevaciones superiores a los 700 m (snmm), mientras que el Desierto de San Sebastián Vizcaíno se caracteriza por un relieve topográfico bajo que forma una extensa llanura, limitada al oriente por las bajadas de la Sierra de La Giganta y al occidente porción sur y norte, por las bajadas de la sierra de Santa Clara, y San José de Castro respectivamente, cuyo relieve se define como sierras bajas, con elevaciones menores a los 700 m (snmm).

De esta manera la región de la Reserva queda mejor representada por las unidades geomorfológicas que la integran, con sierras bajas en su porción occidental (Península de Vizcaíno), sierras altas en la oriental (Sierra de La Giganta) y llanura en la central (Desierto de EL Vizcaíno) (Fig. 2, 3). Las sierras presentan orientación de noroeste-sureste paralelas a la línea de costa, con pendientes de pronunciadas a moderadas, parteaguas agudos y semirredondeados. En general la red hidrográfica es de arroyos de régimen intermitente con un patrón de distribución en las sierras altas que drenan hacia las planicies del desierto del Vizcaíno y al Golfo de California y en las sierras bajas en dirección al Océano Pacífico y a la llanura del desierto del Vizcaíno, en donde las irregularidades topográficas corresponden a cordones de dunas estabilizadas (paleodunas) y activas, así como a la presencia de cerros aislados (inselbers), el drenaje proveniente de las sierras en su mayoría no se integra a ningún régimen y pierden continuidad y salida al mar.

Las unidades geomorfológicas anteriores se encuentran, compuestas a su vez por otras de menor escala, dentro de las cuales es de destacar la franja costera integrada por

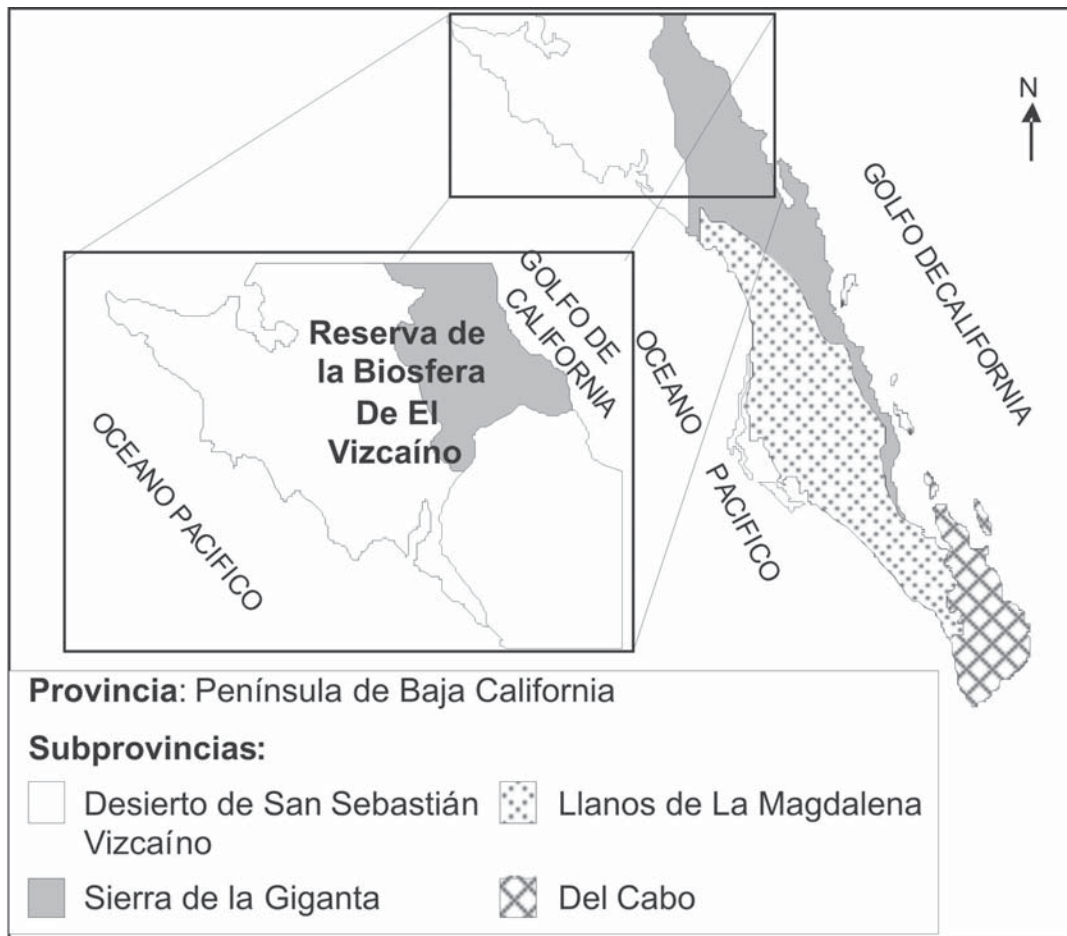


Figura 1. Provincia y subprovincias fisiográficas en la Reserva de la Biosfera de El Vizcaíno.

costas depositacionales y erosivas, las primeras se presentan como continuidad de las llanuras con pendiente suave hacia el Océano Pacífico integrando un sistema de tierras bajas, en donde la acción conjunta de los agentes y procesos terrígenos y costeros han generado costas acumulativas y progradantes, integradas por playas arenosas y sistemas lagunares cuya amplitud varía del orden de decenas de metros a kilómetros, destacando por sus dimensiones San Ignacio y Ojo de Liebre en cuyas marismas se presenta precipitación de minerales evaporíticos.

Las costas erosivas se encuentran mejor representadas en la vertiente oriental de la sierra de la Giganta asociadas a las pendientes abruptas donde predominan rocas volcánicas y volcanoclásticas que limitan con el Golfo de California, así como en la vertiente occidental de la sierra de San José de Castro, que limita con el Océano Pacífico.

I.2.1. Unidades geomorfológicas

Los aspectos geomorfológicos conforman un paisaje contrastante que se representa en bloques diagramáticos (3D), que esquematizan el relieve y los principales rasgos geomorfológicos que caracteriza a la región de la Biosfera de El Vizcaíno, los cuales se describen como sigue:

1) Sierras, esta unidad comprende las sierras Altas y Bajas:

a) *Sierras altas*: Las forma una secuencia de rocas sedimentarias y volcánicas cenozoicas de la Formación Comondú (Mioceno Superior). Esta secuencia presenta fuertes variaciones horizontales y está constituida principalmente por aglomerados volcánicos, areniscas del tipo de las litarenitas y conglomerados, tobas pumicíticas, ignimbritas y basaltos; cubren de forma parcial y discordante a las secuencias sedimentarias marinas del Terciario, que afloran más ampliamente en las cuenca del Vizcaíno (Heim, 1922). El relieve volcánico es el más notable, y predominan los aparatos volcánicos tanto lávicos como piroclásticos. Mina (1957) consideró que la fuente de esta gran cantidad de rocas volcánicas debió haberse encontrado en un cinturón volcánico ubicado al este de la actual costa del Golfo de California.

En esta región los procesos de intemperismo y erosión han labrado mesetas cañones y picachos con laderas escarpadas. Es de hacer notar que la secuencia que constituye la Formación Comondú, muestra un acentuado levantamiento epeirogénico y un buzamiento de sus secuencias inclinadas hacia el oeste, lo cual es claramente perceptible en las mesetas basálticas de San Francisco de la Sierra.

Entre estas geoformas destacan los edificios volcánicos de la zona de las Vírgenes con alturas superiores a los 1800 m. En las Figuras 4 y 5, se representa en tres dimensiones el relieve antes descrito de sierras altas, caracterizado por serranías abruptas con fuertes pendientes, que manifiestan un desarrollo geomorfológico joven para un clima árido.

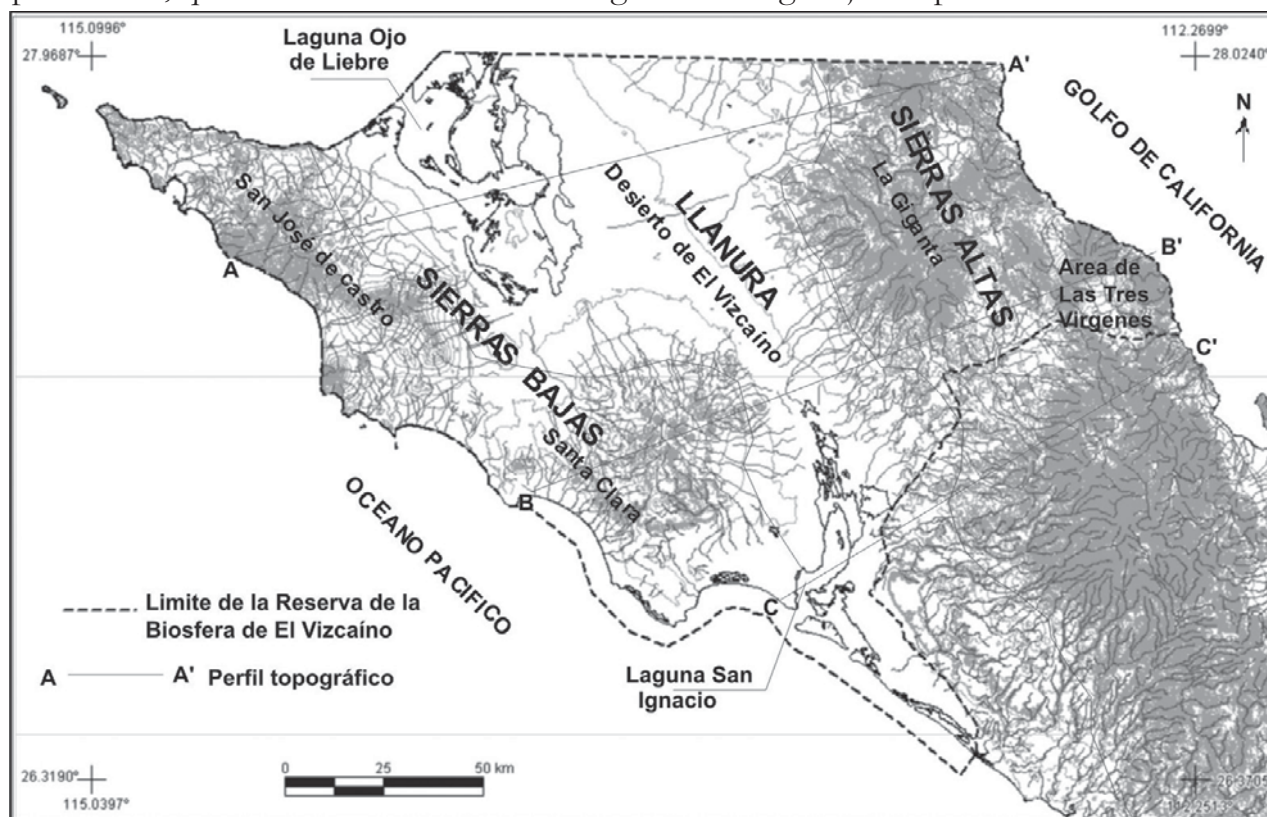


Figura 2. Unidades geomorfológicas en la región de la Reserva de la Biosfera de El Vizcaíno (Los trazos de perfiles topográficos se muestran en la figura 3).

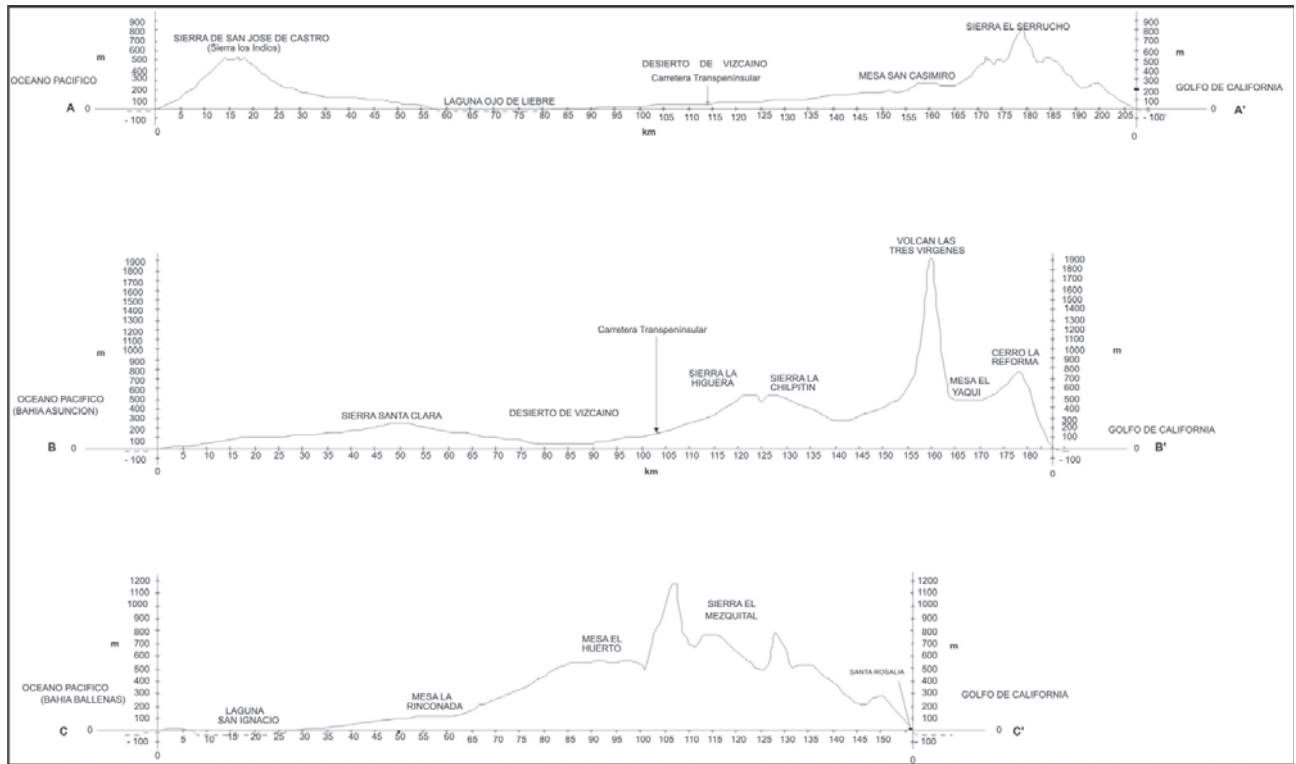


Figura 3. Perfiles topográficos de la región de la Reserva de la Biosfera de El Vizcaíno (su trazo en planta se muestra en la figura 2).

En ésta unidad geomorfológica se distinguen las siguientes subunidades:

- Sierras con Picachos, se encuentran formando las partes más elevadas y se caracterizan por sus pendientes abruptas, en algunas zonas la erosión diferencial a modelado agujas en la roca basáltica.
- Sierras con mesetas basálticas, semiplanas y alargadas, la erosión diferencial en estas da una apariencia escalonada. En general presentan cierta inclinación hacia el oeste. Es importante diferenciar el relieve de “mesetas” ubicadas en la zona de la Sierra el Mezquital donde se ubica el poblado de Santa Rosalía y las cuales corresponden a terrazas marinas pleistocénicas.
- Valles intermontanos, se encuentran diseminados entre las serranías, en cotas superiores a los 250 m, sus dimensiones son variables, y en varios de ellos se encuentran asentadas rancherías como las de Guadalupe, San Francisco de la Sierra, La Calabaza, San Antonio, El Sauce, El Juste, y Santa Martha. De entre estos valles, vale la pena destacar el de El Gato, por ser el de mayor tamaño, se encuentra entre las sierras El Serrucho, San Francisco y Las Tinajas de Murillo y además presenta la particularidad de contener un pequeño lago intermitente, conocido con el mismo nombre, el siguiente es el valle de Las Vírgenes el cual presenta la particularidad de ser un campo geotérmico.

- Valles con lomeríos, se extienden con pendiente suave entre las cotas de los 250 y 150 msnm, son más amplios que los intermontanos y se encuentran limitados por serranías, su relieve semiplano se interrumpe por zonas de lomeríos y cauces de arroyos intermitentes. Esta subunidad se encuentra mejor representada en la zona por donde atraviesa la carretera que comunica a los poblados de Santa Rosalía y San Ignacio. Este valle se encuentra limitado en su porción norte por la Sierra La Higuera y Chilpitin, al sur por la Sierra El Mezquital y al Este por La Sierra Las Vírgenes.

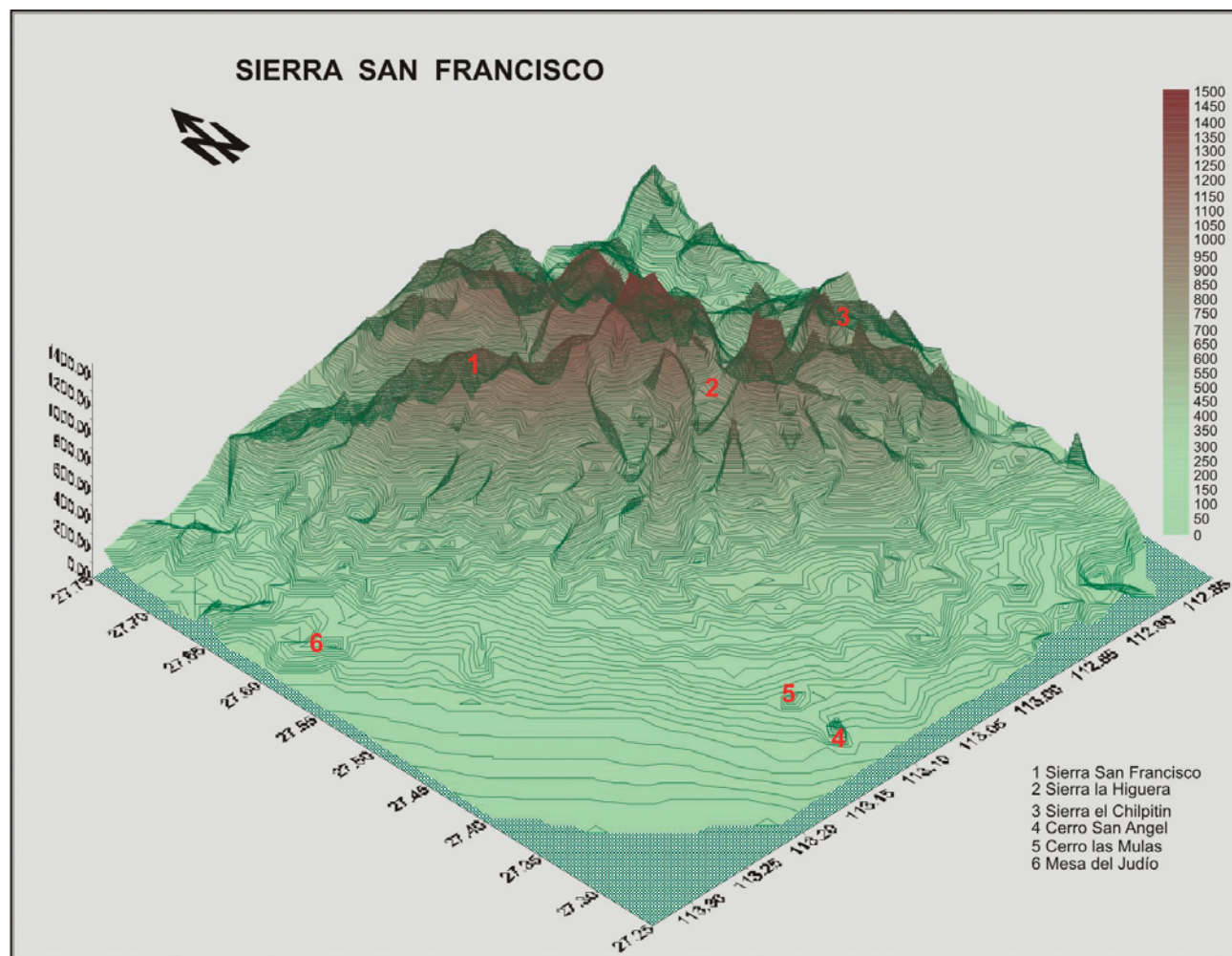


Figura 4. Bloque Diagramático de la porción sur de la Sierra de la Giganta, conocida por la toponimia local Sierra San Francisco (Sierras altas).

- Edificios Volcánicos, Se encuentran formando parte de la Sierra de Las Vírgenes, al noroeste de Santa Rosalía y corresponden a los volcanes las Tres Vírgenes y El Azufre con alturas de 1900 y 1300 m respectivamente. Se hace esta diferenciación debido a que de todos los aparatos volcánicos que se encuentran en la Sierra de la Giganta estos son los mejor conservados con formas cónicas.

- Cañones, con paredes de fuerte pendiente escarpadas, presentan orientación perpendicular a la tendencia principal del eje de la sierra de la Giganta, cortan a las mesetas basálticas con profundidades que van de los 50 metros al pie de la sierras hasta 700 m en la Sierra de San Francisco.
- Bajadas con lomeríos, se encuentran formando la zona de las laderas de las sierras. En la porción occidental de la subprovincia desciende con pendiente moderada entre las cotas de los 200 y 100 m hacia las planicies del Vizcaíno, presenta zonas aisladas de lomeríos. Hacia la porción oriental, ésta subunidad no muestra un desarrollo tan definido como en el caso anterior, puesto que las pendientes son más pronunciadas y en muchas partes las serranías terminan en acantilados.

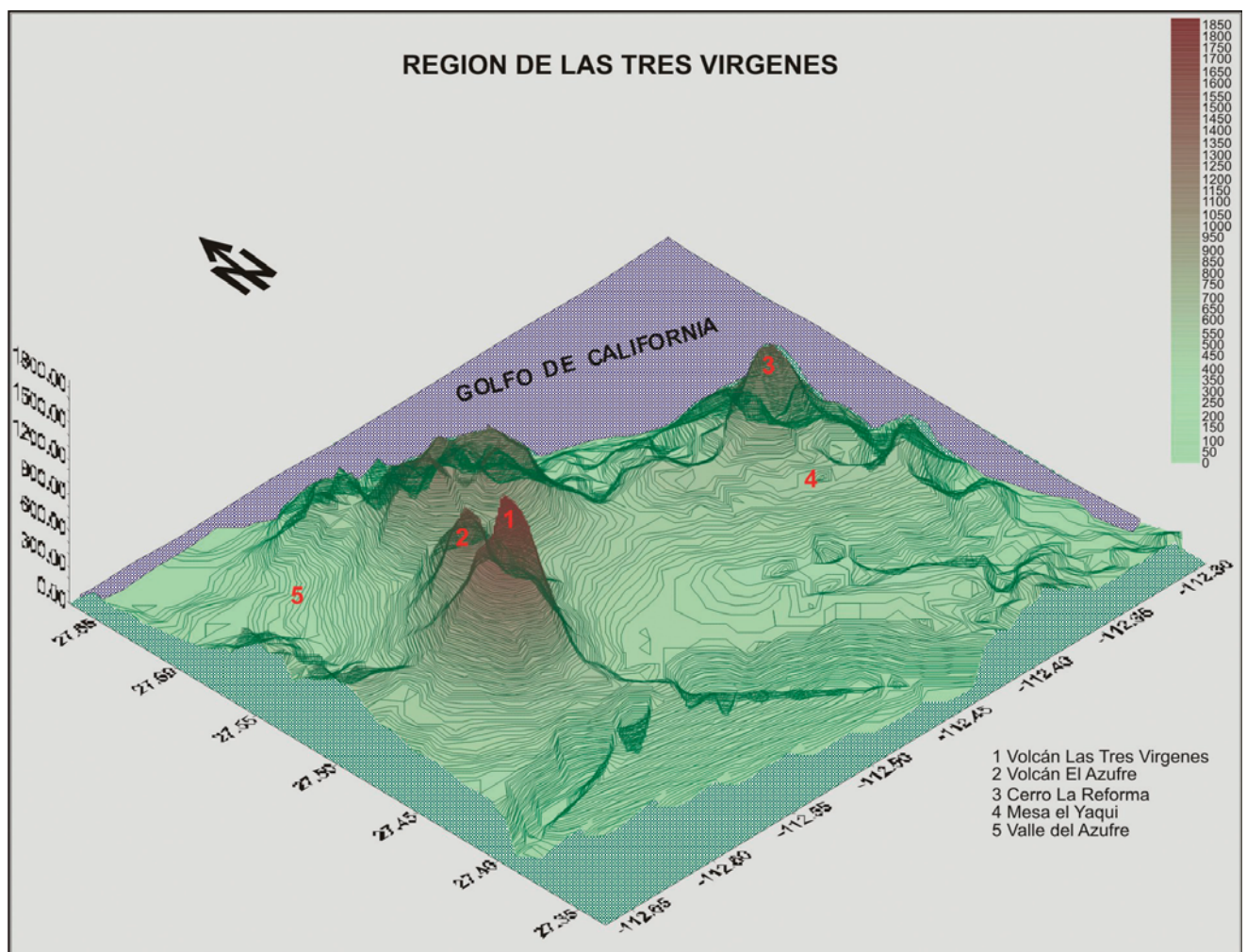


Figura 5. Bloque Diagramático de la porción sur de la Sierra de la Giganta, conocida por la toponimia local como las tres vírgenes (Sierras altas).

b) *Sierras bajas* : Se ubican al occidente de la Reserva, las constituyen la Sierra de Santa Clara, y San José de Castro (Fig. 2), presentan elevaciones menores a los 700 m. Su

relieve involucra rocas metamórficas, ígneas y sedimentarias, con un rango geocronológico del Triásico superior al Cuaternario. Las unidades litológicas de esta zona han sido estudiadas por diferentes autores, quienes las agrupan y clasifican en Formaciones Estratigráficas (ver apartado de Geología), con lo cual es posible diferenciar los eventos geológicos que han modelado la geomorfología en la región.

De estos eventos destacan los registrados en la formación San Hipólito en donde las secuencias litológicas se encuentran deformadas en pliegues recumbentes. De igual forma la presencia de un Complejo Ofiolítico atestigua la evolución estructural de una paleocorteza oceánica, lo cual sugiere para el intervalo del Triásico Superior al Jurásico una gran actividad tectónica. Las subsecuentes Formaciones sedimentarias y Vulcano sedimentarias del Jurásico Superior al Pleistoceno, atestiguan diferentes eventos de regresiones y transgresiones marinas, así como cierta actividad volcánica, aunque de forma menos intensa que la registrada en la Formación Comondú (Sierra de la Giganta (Sa)). De esta manera la acción de los procesos endógenos (actividad tectónica) a los cuales se suma la actividad de los exógenos controlados por el clima (intemperismo, erosión y acumulación), han generado un paisaje caracterizado por una topografía de picachos, lomeríos, mesas y terrazas marinas, y cuya topografía está controlada por el efecto de erosión diferencial al actuar en tres diferentes tipos de rocas (sedimentarias, ígneas y metamórficas).

En las Figuras 6 y 7 se esquematiza en tres dimensiones los rasgos morfológicos de la Sierra de Santa Clara y parte de la Sierra de San José de Castro respectivamente, en estas se ilustran los principales rasgos topográficos que las diferencian de la unidad anterior (Sierras altas Sa), con una menor altura y menos accidentadas. Sin embargo los rasgos morfológicos referidos sitúan a ésta unidad, en un desarrollo geomorfológico de juventud para un clima árido. En estas sierras se distinguen las siguientes subunidades geomorfológicas:

- Sierras con Picachos y lomeríos, forman las partes altas de las sierras, en estas los procesos de erosión diferencial en rocas metamórficas, ígneas y sedimentarias a modelado picachos y lomeríos con pendientes pronunciadas.
- Sierras con mesetas sedimentarias, se encuentran formando las partes intermedias y bajas de las sierras, se caracterizan por su forma alargada, cima plana y laderas pronunciadas de entre 100 y 250 metros, labradas en rocas sedimentarias, que de acuerdo a la toponimia local se les conoce como mesas. Hacia la periferia de las lagunas Ojo de Liebre y San Ignacio éstas corresponden a terrazas marinas pleistocénicas.
- Valles intermontanos, se ubican limitados entre las serranías en cotas superiores a los 250 m, presentan superficies variables y menos frecuentes que en la subprovincia de la Sierra de la Giganta.
- Valle con lomeríos, son de mayor dimensión que los intermontanos y se extienden con pendiente suave entre las cotas de los 150 a 250 (msnm). Su relieve semiplano

se interrumpe por zonas de lomeríos y cauces de arroyos intermitentes.

- Cañadas, a diferencia de la unidad de cañones que se describe para la subprovincia de la Sierra de la Giganta, estas son menos profundas y de valles amplios los cuales tienden a ensancharse aun más hacia su desembocadura. Sus pendientes son moderadas.
- Bajadas con Lomeríos, forman las laderas de las sierras entre la cota de los 200 y 100 m, se extienden con pendientes de moderada a suave, y presentan zonas de lomeríos aisladas, en estas predominan los depósitos Cuaternarios residuales y de coluvión.

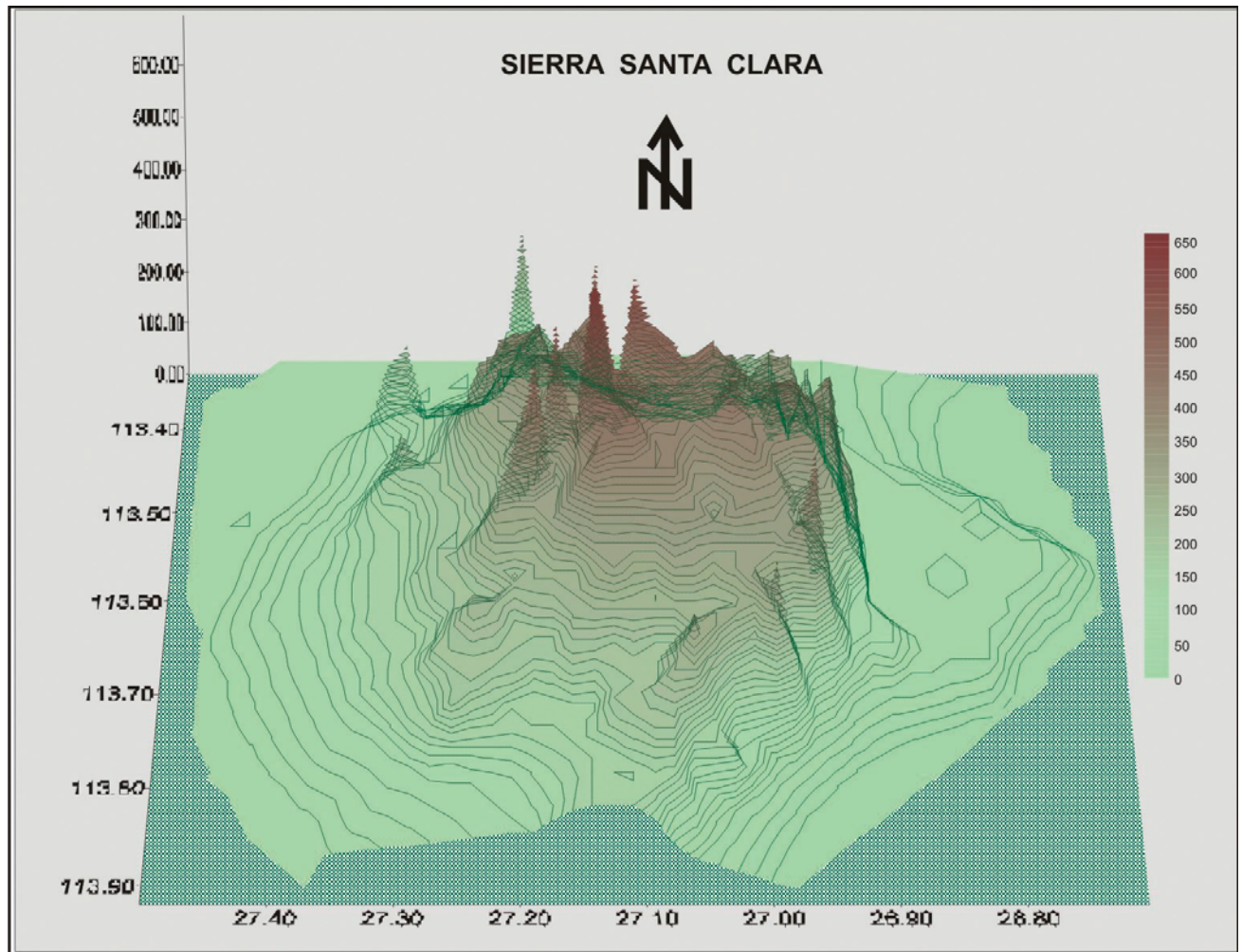


Figura 6. Bloque Diagramático de la Sierra Santa Clara (sierras bajas).

2) llanura de Sebastián Vizcaíno: forma la parte superior del relleno de una gran estructura que forma un sinclinal con orientación noroeste-sureste, conocida como Cuenca del Vizcaíno (Fig. 11) (Lozano, 1976). En superficie esta unidad geomorfológica se extiende hacia el poniente a partir de las estribaciones (bajadas) de las sierras altas de la Giganta, la cual desciende con pendiente suave, conformando una topografía ondulada de bajo relieve. En esta unidad predominan los depósitos detríticos Cuaternarios de origen eólico, aluvial, coluvial y

proluvial, así como el desarrollo incipiente de suelos, los cuales han evolucionado sobre suelo altamente salino como evidencia de transgresiones y regresiones marinas efectuadas en los últimos milenios (DGAIA, 1983; INEGI, 1996; INEGI, 1984a). Las ondulaciones del terreno corresponden básicamente a la acumulación eólica que a generado cordones longitudinales de dunas activas e inactivas o estabilizadas (paleodunas). Las características topográficas y litológicas de esta unidad ocasionan que la red de drenaje (intermitente) proveniente de las sierras se pierda. Debido a esto la mayor parte de los arroyos en las llanuras no se integran a ningún régimen hidrológico y pierden continuidad y salida al mar.

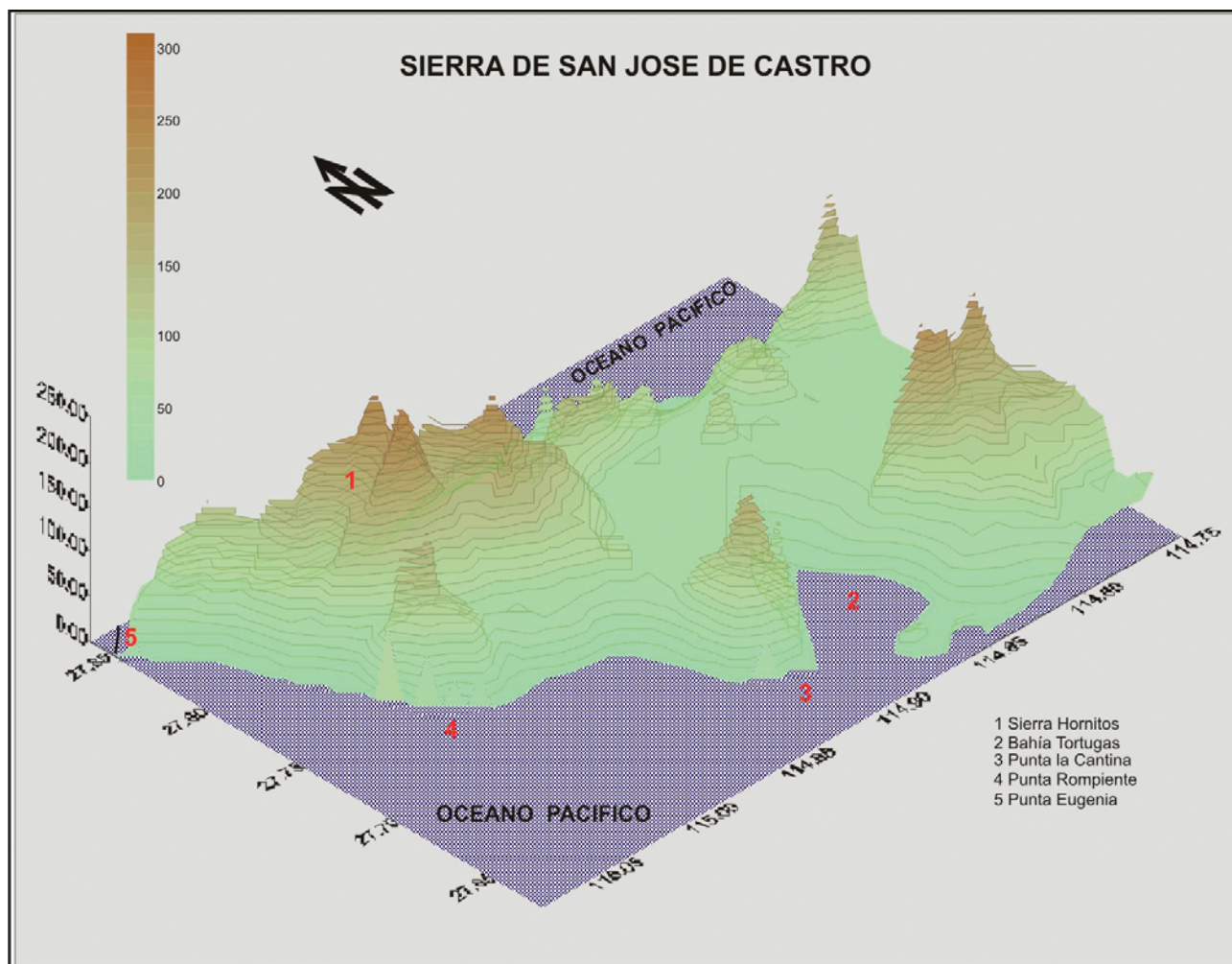


Figura 7. Bloque Diagramático de la porción noroeste de la Sierra San José de Castro (Sierras bajas).

En el relieve semiplano destaca la presencia de lomeríos y cerros isla (inselbers), diseminados en toda la unidad, como evidencia de un relieve preexistente que a sido erosionado y sepultado, debido a la acción de los agentes endógenos y exógenos. En la figura 8, se muestran los aspectos, caracterizado por su bajo relieve que se extiende hacia la franja costera. Por las características topográficas que muestra esta unidad, se considera un desarrollo geomorfológico de vejez para un clima árido donde destaca el relieve acumulativo

de los depósitos eólicos.

Por su extensión es posible diferenciar las siguientes subunidades geomorfológicas:

- Llanura con suelos compactos, esta unidad se desarrollan suelos limosos con estratos delgados de caliche, por lo general en áreas asociadas a las bajadas de las sierras.
- Llanura con depósitos terrígenos, destacan los cordones de dunas inactivas, presentan una amplia distribución, dan forma a un relieve topográfico ondulado debido a que los cordones se encuentran paralelos entre sí con orientación preferencial noroeste sureste, su estabilidad se debe a la presencia de cobertura vegetal y al alto contenido de limo y arcilla que tienden a rellenar los intersticios entre las partículas de arena causando un efecto cohesivo y cementación por lo que las dunas pierden su capacidad de migración.
- Cerros isla (inselbers), también se les conoce como cerros testigo, son de escasa altura y se encuentran diseminados en toda la llanura. Son la evidencia de una antigua topografía que a sido nivelada y/o sepultada por procesos de erosión y acumulación.
- Franja Costera Esta unidad está compuesta por costas depositacionales y erosivas:

a) Costas depositacionales: Tienen su mejor desarrollo en la vertiente occidental de la Reserva de la Biosfera de El Vizcaíno, en cuya zona oceánica se a desarrollado plataforma continental. En esta unidad se encuentran costas erosivas, aunque con una distribución restringida a lugares donde la sierra de San José de Castro, limita con el Océano Pacífico.

Las costas depositacionales se presentan como continuidad de las llanuras hacia la línea de costa, forman un sistema al que algunos autores refieren como “Tierras Bajas”, donde predominan los depósitos litorales arenosos y limo arcillosos del Cuaternario. Esta unidad forma una franja de amplitud irregular y paralela a la línea de costa. Su orden de magnitud varia de decenas de metros en zonas donde se han desarrollado playas arenosas limitadas por cordones de dunas, a kilómetros en las áreas más bajas donde se forman planicies de inundación (limo - arcillosas) generalmente asociadas a los sistemas de lagunas costeras, como Ojo de Liebre y San Ignacio. En general esta unidad forma un frente depositacional complejo considerado como zona de transición entre el océano y tierra emergida, consecuentemente aquí interactúan con gran rapidez los procesos costeros, continentales y climáticos, que le confieren características morfológicas particulares bien definidas como los esteros y lagunas.

De igual forma se reconocen otros rasgos geomorfológicos de menor escala como las barreras arenosas que dieron origen a los sistemas lagunares holocénicos, playas arenosas, campos de dunas (activas), y pantanos de manglar. De acuerdo a Inman y Nordstrom (1971), por los antecedentes tectónicos de la península, estas costas son de colisión continental debido a la subducción de la paleocorteza oceánica, que durante el Mesozoico se hundió bajo la corteza continental occidental.

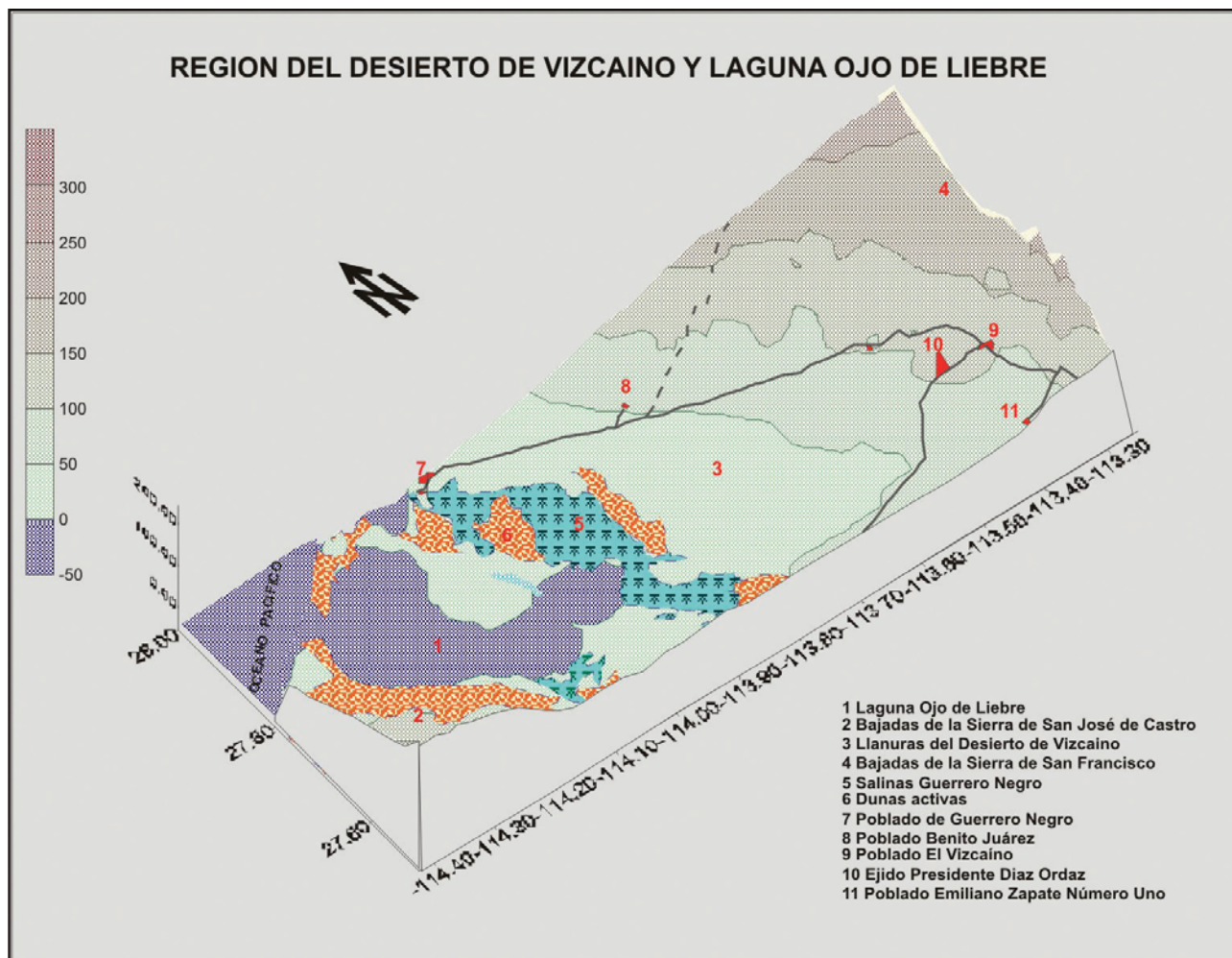


Figura 8. Bloque diagramático que muestra parte de las llanuras del Desierto del Vizcaíno y la laguna Ojo de liebre (Llanuras y costas depositacionales).

Por otra parte con los criterios Geomorfológicos y Genéticos de Shepard (1973), en ésta franja costera se presentan: Costas primarias, por depositación subaérea, por viento (costas con dunas); Costas secundarias, por erosión de oleaje (costas con terrazas elevadas, cortadas por oleaje) y Costas secundarias, por depositación marina, (costas con barreras arenosas, islas de barrera, tómbolos arenosos y bahías de barrera).

En el la figura 8, se muestra la relación entre las llanuras y la franja costera, y cuyas características topográficas, sitúan a esta unidad en un desarrollo geomorfológico de juventud para un clima árido.

En esta unidad es posible distinguir las siguientes subunidades geomorfológicas:

- Dunas activas, se ubican hacia la periferia de los sistemas lagunares y algunos sitios aislados de las llanuras. Presentan diferentes tipos de desarrollo que van desde dunas multidireccionales de apenas un metro de altura a barjanes con alturas de hasta 10

- metros, formados por arena de textura fina.
- Planicies de Inundación, pantanos y salitrales, son de relieve topográfico bajo y prácticamente plano, en todos los casos se encuentran sujetos al efecto de las mareas y asociados a los sistemas lagunares, sus dimensiones son variables, siendo los de mayor tamaño los ubicados en la periferia de la laguna San Ignacio y Ojo de Liebre. Se caracterizan por sustratos limo arcillosos y alto contenido de sales así como por un espejo de agua de apenas unos centímetros sin llegar a sobrepasar los 0.5 m de profundidad.
 - Sistemas lagunares, se distribuyen a lo largo de la línea de costa occidental y corresponden a cuerpos de agua poco profundos y protegidos de mar abierto por barreras arenosas, el intercambio de agua con el océano se efectúa a través de sus entradas (bocas) y canales de marea, por sus dimensiones destacan la laguna de San Ignacio en la porción sur y Ojo de Liebre en la porción norte. Estos sistemas lagunares tienen su origen con el establecimiento del nivel del mar durante el Holoceno, y constituyen el relieve más bajo en el extremo oeste de la Subprovincia Desierto de San Sebastián Vizcaíno. Corresponden a un frente depositacional como zona de transición entre el océano y tierra emergida. En su periferia predominan los depósitos Cuaternarios litorales, dunas y planicies de Inundación con sustratos limo arcillosos, sujetos al efecto de las mareas lo cual favorece el estancamiento de agua de mar y la precipitación de minerales evaporíticos (salitrales).
 - Playas arenosas, se encuentran distribuidas a lo largo de la línea de costa formando extensas fajas angostas limitadas tierra adentro por campos de dunas multidireccionales activas. Tienden a ser altamente modificables en su perfil de playa debido al tipo de material que las constituye (arenas no consolidadas y no cohesivas) y por estar expuestas a la acción directa del oleaje. Esta particularidad puede ser perceptible a diferencia de las costas acantiladas que evolucionan a escalas de espacio y tiempo más difíciles de controlar por el ser humano.
 - Islas de barrera y playas de barrera, forman las caras de las barreras arenosas por lo que su distribución esta restringida a estas, al igual que la unidad anterior son altamente modificables e inestables sobre todo en periodos de tormentas. Estas estructuras son consideradas típicas de costas depositacionales con abundante material sedimentario disponible y donde existe una dinámica litoral lo suficientemente intensa para generar un transporte longitudinal del sedimento suficiente tanto para su génesis como para su evolución.

b) Costas erosivas: Esta subunidad se encuentra mejor representada en la costa oriental, su distribución y características morfológicas se encuentran asociadas a las pendientes abruptas de la Subprovincia Fisiográfica Sierra de la Giganta donde predominan rocas volcánicas y volcanoclásticas del Mioceno Superior que limitan con el Golfo de

California cuyos aspectos batimétricos señalan escaso o nulo desarrollo de plataforma continental, aspectos que en conjunto caracterizan la estrecha faja costera oriental de la Reserva. De acuerdo a la clasificación tectónica de Inman y Nordstrom (1971), esta unidad corresponde a costas de arrastre de neo-eje, por efecto del sistema de fallas de San Andrés. De acuerdo a los criterios Geomorfológicos y Genéticos, propuestos por Shepard (1973), en ésta franja se presentan Costas primarias formadas por movimientos diastróficos, costas de fallas y de rift; Costas secundarias, por erosión de oleaje, promontorios cortados por olas, tanto en materiales homogéneos como heterogéneos. En contraste la costa occidental, se encuentra asociada a una plataforma continental mejor desarrollada, por lo que las costas erosivas se encuentran restringidas a las laderas de la porción occidental de las sierras de San José de Castro que limita con el Océano Pacífico.

En esta unidad se diferencian las siguientes subunidades geomorfológicas:

- Acantilados, ampliamente distribuidos en las zonas donde las laderas de las sierras se encuentran formando parte de la línea de costa, por lo que están expuestas a la acción erosiva de la marea y oleaje. Su acción origina cuñas de erosión con terrazas y nichos, entre los niveles de marea baja y alta, terminando por desestabilizar y fracturar las laderas y la caída de bloques rocosos. De esta manera se produce el remodelado de las laderas en paredes prácticamente verticales.
- Playas rocosas, se encuentran asociadas o muy cercanas a los acantilados, y en las desembocaduras de los arroyos. se constituyen por bloques y cantos redondeados. Su perfil de playa tiende a ser muy pronunciado debido al escaso o nulo desarrollo de la plataforma continental.

En la figura 9, se muestran los rasgos de acantilados característicos de esta franja costera, y cuya topografía, sitúan a esta unidad en un desarrollo geomorfológico de juventud para un clima árido. La comparación de las Figuras 9 y 10, resaltan las diferencias entre las costas depositacionales en la vertiente Pacífico de las erosivas en la vertiente del Golfo de California.

Las unidades y subunidades geomorfológicas antes descritas integran en su conjunto el paisaje agreste característico de la región de la Reserva de El Vizcaíno, cuyo relieve topográfico se resume en los perfiles de la figura 3, haciendo evidente las diferencias geomorfológicas, entre las sierras altas y bajas, así como entre las costas erosivas del Golfo de California, con respecto a las costas depositacionales en la costa Pacífico. De igual forma nos permiten señalar que la meteorización es más intensa en las sierras donde se produce un mayor escurrimiento durante las temporadas de lluvia, las cuales favorecen el acarreo de detritos y su depósito al pie de las montañas, formando los mantos de piedemonte o bajadas que limitan hacia el occidente a las llanuras del desierto del Vizcaíno, y Al mismo tiempo

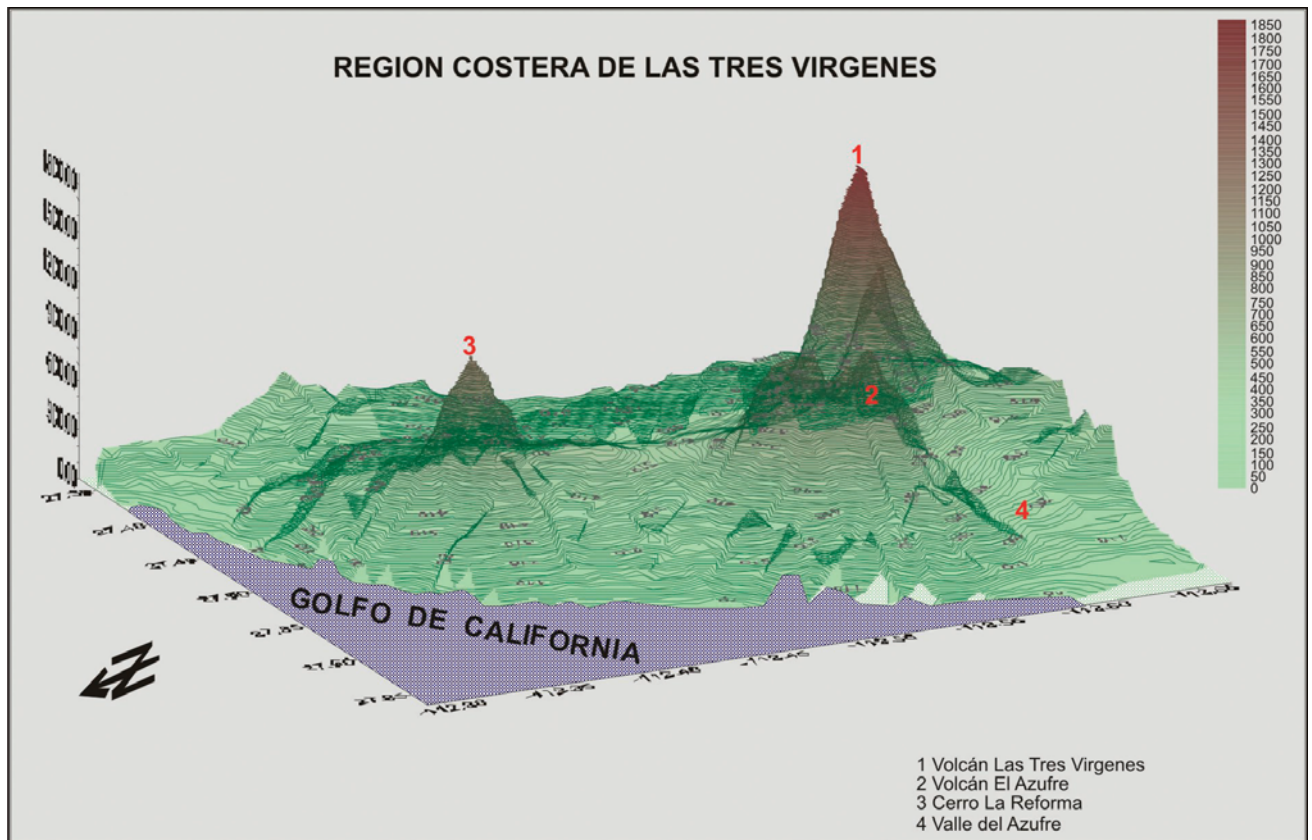


Figura 9. Bloque diagramático que muestra parte de la franja costera en la vertiente oriental de la Sierra La Giganta conocida en la toponimia local como las Tres Virgenes (Costas erosivas).

dicha descripción evidencia que la cuenca sedimentaria del Vizcaíno se encuentra formada en superficie por diferentes ambientes de depósito Cuaternarios (residuales, coluvión, aluviales, eólico, lacustre, playa, Planicies de Inundación y salitrales) los cuales generan cambios de facies sedimentarios de forma lateral, desde las bajadas de las sierras hasta los sistemas lagunares. Aspecto que cobra importancia en el control geohidrológico y calidad de agua de los acuíferos subsuperficiales de la Reserva.

I.3. Geología

En la región de la Reserva los afloramientos rocosos, presentan un rango geocronológico del Triásico al Reciente, cuya distribución espacial evidencia una alta complejidad estructural y estratigráfica. Sin embargo es posible identificar en función del marco tectónico regional de Baja California Sur, (CRM, 1999), así como por la persistencia de los afloramientos rocosos y rango estratigráfico, una distribución geológica generalizada en tres franjas (Fig. 10), las cuales coinciden con las unidades geomorfológicas descritas anteriormente:

Franja occidental Bloque tectónico mesozoico, asociada a la unidad geomorfológica de Sierras Bajas. En estas sierras afloran las rocas metamórficas, ígneas y sedimentarias más

antiguas de la región con un rango del Triásico superior al Cuaternario (CRM, 1999). Destacan las rocas del Triásico al Jurásico Inferior integradas por ofiolitas y secuencias de tipo mélange acrecionadas, las cuales manifiestan la evolución estructural de una paleocorteza oceánica en

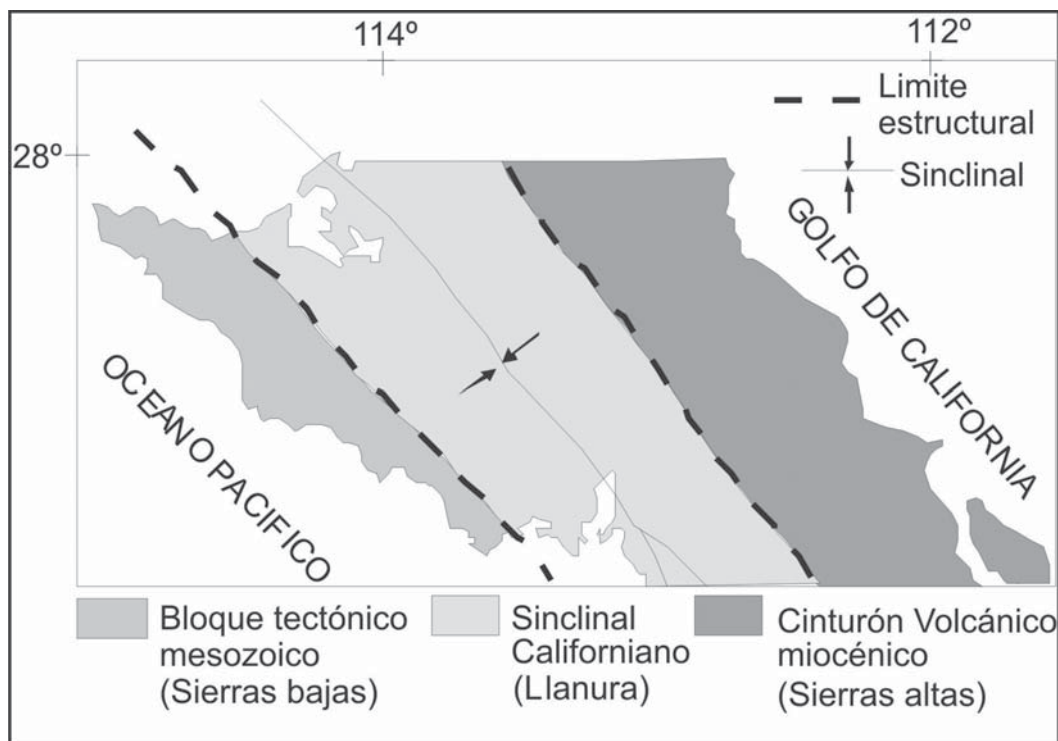


Figura 10. Esquema tectónico de la Reserva de la Biosfera de El Vizcaíno. (modificado de CRM, 1999).

un límite convergente, producto del choque de la placa de América del Norte y la placa del Pacífico, ocasionando subducción, abducción y cabalgamientos por parte de rocas del piso oceánico, que arrancaron partes de la corteza continental y las mezclaron, en el complejo mélange de Puerto Nuevo, el cual está formado por rocas metamórficas formadas a altas presiones y bajas temperaturas (esquistos verdes y azules de pumpellyta-actinolita, anfibolitas de epidota y eclogitas) (Moore, 1984).

Las rocas más antiguas en esta franja integran rocas sedimentarias tobáceas de las formaciones San Hipólito del Triásico Superior, así como por conglomerados, areniscas, arcillas y lavas almohadilladas, relacionadas con la Formación Eugenia, Perforada, Asunción y Alisitos del Jurásico Superior – Cretácico Inferior (Moore, 1984; INEGI, 1984 c; CRM, 1997a, 1999; DGIAl, 1983).

Franja oriental Cinturón Volcánico miocénico, asociada a la unidad geomorfológica de sierras altas, destacan las rocas volcánicas de la Formación Comondú, del Mioceno que llegan a alcanzar en conjunto, hasta 1200 metros de espesor, y presenta variaciones horizontales que se explican mediante un modelo de facies volcánica no marino que muestra tres zonas, una proximal donde abundan las brechas volcánicas monolíticas, brechas intercaladas,

aglomerados y areniscas tobáceas de grano grueso; facies central, con predominio de derrames de lava y depósitos de ceniza y coluviales; y facies volcánica distal, con areniscas tobáceas y aglomerados de grano fino a medio (Hausback, 1984; CRM, 1999).

Mina (1957) consideró que el suministro de esta gran cantidad de rocas debió haberse encontrado en un cinturón volcánico ubicado al este de la actual costa del Golfo de California, cuyo origen se asocia al arco magmático miocénico a lo largo del margen occidental de México producto de la subducción de la placa de América del Norte con el margen noroccidental de México durante el Terciario (Hausback, 1984; Sedlock et al, 1993; CRM, 1999).

Hacia la porción sureste de esta franja afloran formaciones sedimentarias marinas y volcánicas del Pleistoceno inferior y superior respectivamente. Las formaciones sedimentarias corresponden al Boleo, Gloria, Infierno y Santa Rosalía (Wilson, 1948), depositadas en la Cuenca Neógena de Santa Rosalía, la cual se encuentra limitada al norte y noroeste por los edificios volcánicos plio-cuaternarios de la Reforma y de las Tres vírgenes, y al oeste y suroeste por la Sierra Santa Lucía. En esta área la presencia de terrazas marinas, manifiestan la emersión cuaternaria de la cuenca y ponen de manifiesto episodios de alto nivel marino de los periodos interglaciares del Pleistoceno Medio y Tardío (Ortlieb y Colletta, 1984).

Las formaciones sedimentarias se encuentran integradas principalmente por conglomerados continentales, deltáicos y litorales, caliza, areniscas marinas, brechas, tobas y pómez.

Por su parte las rocas Volcánicas pleistocénicas se ordenan cronológicamente en tres complejos volcánicos Cuaternarios: Caldera de la Reforma, Sierra de El Aguajito (o de Santa Ana) y Las Tres Vírgenes:

Las rocas volcánicas del complejo de la Reforma se dividen en dos series principales: una serie pre-caldera, caracterizada por intrusiones básicas, derrames de lava, erupciones submarinas (Plioceno), y derrames basálticos y andesíticos subaéreos (Pleistoceno Temprano); y la serie de la caldera (Pleistoceno Medio), integrada por ignimbritas y andesitas localmente cubiertas por domos riolíticos y derrames basálticos (Demant, 1981, 1984).

En la región de las Tres Vírgenes, la secuencia de rocas se divide en tres unidades principales: andesitas de la Sierra Santa Lucía (Grupo o Formación Comondú, Mioceno), Basaltos de Esperanza (Mioceno Tardío), y basaltos y dacitas de los estratovolcanes cuaternarios Tres Vírgenes y El Azufre (Sawlan, 1981).

De manera generalizada podemos referir el origen y emplazamiento de las rocas pliocénicas anteriormente descritas, como resultado de la actividad tectónica asociada a la apertura del Golfo de California, así como a transgresiones marinas ligadas a períodos de alto nivel marino ((interglaciares), acompañadas de procesos de emersión (Ortlieb y Colletta, 1984).

Franja central Subcuenca Vizcaíno o Sinclinal Californiano, asociado a la unidad geomorfológica de Llanura, con predominio en superficie de depósitos detríticos Cuaternarios

de origen eólico, aluvial, coluvial y proluvial.

La subcuenca Vizcaíno se encuentra rellena de rocas sedimentarias de las formaciones del Mesozoico (Formación Valle), y Cenozoico (Formaciones Santo Domingo, Malarrimo, Bateque, Zacarías, Santa Clara, La Zorra, San Joaquín, Isidro, San Ignacio, Tortugas, San Raymundo, Almejas), que atestiguan ambientes costeros, lagunares y de plataforma, las cuales afloran principalmente en la franja occidental (Sierras Bajas) donde se encuentran plegadas y falladas, formando estructuras anticlinales y sinclinales orientados NW-SE, paralelos a la costa Pacífico (INEGI, 1984d; CRM, 1998c, 1999; DGI, 1983).

El origen de estas formaciones se encuentra asociada a sedimentación y transgresiones marinas acompañadas de procesos de emersión y movimientos compresionales y tensionales en diferentes épocas, tectónica que puede ser atribuible como respuesta de la subducción de la Placa del Pacífico bajo la Placa Continental Americana, así como a la apertura del Golfo de California, en mayor o menor grado (PEMEX, 1976).

Según Sedlock et, al. (1993), las franjas antes descritas, integran dos terrenos tectonoestratigráficos que nombran como terreno Cochimi y Yuma, descritos anteriormente por Campa y Coney (1983), como terreno Vizcaíno y Alisitos respectivamente, los cuales constituyen el basamento de la cuenca de El Vizcaíno (Fig. 11). El Terreno Cochimi abarca la Franja occidental Bloque tectónico mesozoico (sierras bajas), el cual Sedlock et, al. (1993), dividen en tres subterrenos: Choyal, Vizcaíno Norte y Vizcaíno Sur (los dos últimos dentro de la Reserva) y los interpretan como fragmentos de arcos de isla que se formaron, sobre la corteza oceánica del Triásico Superior y que fueron acrecionados al borde continental de América del Norte en el Jurásico Tardío o en el Cretácico Temprano, cuando fueron juxtapuestos uno contra el otro a lo largo de una zona de falla que contiene la mélangue de la sierra Placeres (Moore, 1985). Estos subterrenos, se integra por ofiolitas del Triásico cubiertas por la Formación San Hipólito, Eugenia, así como por la formaciones Perforada y Asunción del Jurásico Superior – Cretácico Inferior y por la Formación Valle del Cretácico Superior.

El Terreno Yuma, lo integran rocas de arco magmático del Jurásico y Cretácico y rocas clásticas de tipo *Flysch* del Triásico-Cretácico, intruidas por granitoides del Batolito Peninsular (edades de 140-80 Ma; Ortega-Rivera, 2003). Se presenta en forma aislada al noreste y en las inmediaciones de Loreto al centro-este de la entidad y se encuentra cubierto, en su mayor parte, por rocas sedimentarias y volcánicas del Terciario que integran en superficie a la unidad geomorfológica de Sierras Altas (CRM, 1999).

El contacto entre el terreno Cochimi y Yuma se encuentra cubierto por rocas Jurásicas, Cretácicas y Terciarias, así como por depósitos Cuaternarios del Desierto del Vizcaíno que en superficie integran a la unidad geomorfológica de Llanura (Moore, 1984; Barnes, 1984) (Fig. 11).

I.4. Geología estructural

La región de la Reserva de la Biosfera de El Vizcaíno, se encuentra en una gran estructura en forma de depresión denominada Cuenca del Vizcaíno (Fig. 11). La orientación de esta estructura es noroeste-sureste y se encuentra cubierta por sedimentos derivados de las sierras. Lozano (1976), interpretó la cuenca basado en datos geofísicos y perforaciones realizadas por PEMEX, como un sinclinal e identificó una secuencia litológica del Triásico al Reciente, menciona que los sedimentos que la forman se acuñan en rocas ígneas en la porción oriental y señala la existencia a profundidad de un bloque levantado de rocas ofiolíticas que separa a la Cuenca del Vizcaíno de la de Purísima-Iray-magdalenita y cuya orientación es perpendicular a la tendencia general de la península entre los paralelos 27 y 28°.

El marco tectónico y tectonoestratigráfico anteriormente descrito, caracteriza la evolución estructural según la incidencia en mayor o menor grado de la actividad tectónica, que en principio dio origen en la porción occidental de la Reserva al complejo ofiolítico de rocas metamórficas, resultado de la evolución estructural de una paleocorteza oceánica, que durante el Mesozoico se hundió bajo la corteza continental occidental, hasta la actividad tectónica del Plioceno en la porción oriental asociada a la separación de la península durante la apertura del Golfo de California mediante fallamiento tipo extensional que genera hasta la fecha la migración de la península de Baja California hacia el NW.

De esta manera se describen los principales rasgos estructurales en la Reserva de la Biosfera de El Vizcaíno según el esquema tectónico (CRM, 1999):

Franja occidental, Bloque tectónico mesozoico (terreno Cochimi), se encuentra afectada por un sistema de estructuras de tipo regional con orientación NW-SE, conservando el mismo rumbo de la península de Baja California, así como por un sistema de fallas NE-SW, de menores dimensiones. Las estructuras en esta región corresponden a fallas de corrimiento lateral izquierdo, donde el bloque norte se desplazó al NW aproximadamente 3 km, como se observa en el área de Morro Hermoso (Kimbrough, 1982; Sedlock et al., 1993; CRM, 1999; Castro-Leyva et al., 2001).

Las inclinaciones medidas en este sistema varían de 65° a 85°, al NE y al SW. La edad de este fallamiento se considera post-Jurásico Superior, asociado a las cabalgaduras del complejo ofiolítico, sobre el complejo volcánico San Andrés (Aparicio-Cordero y Avalos-Zermeño, 1977).

Los aspectos estructurales de esta región señalan un alto grado de complejidad tal como lo evidencian las rocas de la Formación San Hipólito, que se encuentran muy deformadas, al grado de presentar pliegues recumbentes que contrarrestan con el resto de las rocas que afloran en el área, además presentan una tendencia estructural totalmente desarmónica con el rumbo dominante de los planos axiales de la Formación Valle Salitral del Cretácico Superior, puesto que son oblicuas entre sí (INEGI, 1984c).

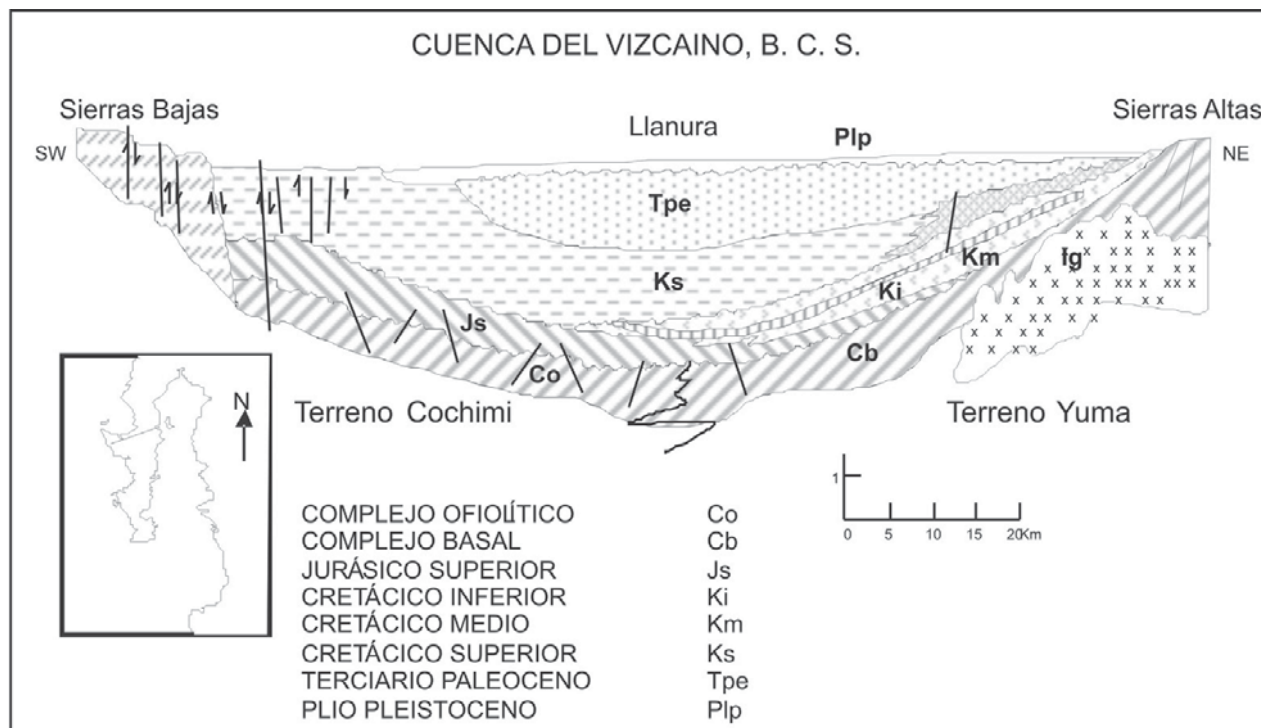


Figura 11. Interpretación a profundidad del sinclinal de la Cuenca del Vizcaíno, según Lozano (1976)(modificada de PEMEX, 1976).

Las formaciones sedimentarias del Jurásico Superior y Cretácico se encuentran plegadas y falladas, conformando estructuras anticlinales y sinclinales orientados NW-SE, paralelos a la costa del Pacífico. En la Formación Eugenia, los pliegues se pueden seguir hasta 15 km a lo largo de su eje, así como en la formación Valle (Mina, 1957; CRM, 1999). El plegamiento que presentan los sedimentos de finales del Cretácico, es menos intenso y muestra una tendencia NW-SE, la fase de deformación es muy probable que haya alcanzado la base del Eoceno, ya que la parte inferior de la Formación Bateque presenta discordancias angulares de carácter local, evidencia que apoya el origen tectónico de acreción del terreno Cochimi. Aunado a esto en la misma parte se observan estructuras tipo “flama” y pequeñas dislocaciones ocasionadas por fallas de empuje que cortan unos cuantos estratos y se interrumpen bruscamente, lo cual denota inestabilidad de la cuenca durante el depósito. Hacia la parte media y superior de esta Formación desaparecen dichos rasgos estructurales lo que indica que la cuenca se estabilizó, a partir de ese lapso solamente ocurrieron levantamientos y subsidencias sin esfuerzos compresivos (INEGI, 1984c).

Franja oriental Cinturón Volcánico miocénico, con rocas volcánicas de la Formación Comondú que forman la cresta de la sierra de la Giganta, y sobreyacen discordantemente a las secuencias sedimentarias marinas del Terciario que afloran más ampliamente en las cuencas del Vizcaíno y Purísima-Iray. Estas secuencias de rocas sobreyacen discordantemente a su vez al terreno Yuma (DGIAI, 1983; Sedlock et, al., 1993; CRM, 1999).

Dentro de esta franja se presentan tres patrones de fallas, el dominante adopta una dirección noroeste-sureste, de las cuales destaca la falla transcurrente de Santa Rosalía; a la que se encuentran asociados los aparatos volcánicos de las Vírgenes, el siguiente patrón de fallas se observa en dirección noreste-suroeste y por último el que va de norte a sur (INEGI, 1984b, d).

En la secuencia de la Formación Comondú, se encuentran acuñaamientos y lengüetas de los materiales volcánicos con los detritos derivados de ella (areniscas y conglomerados), que probablemente marca los inicios de la separación del bloque Californiano del resto de la masa continental. Los derrames basálticos se encuentran en posición horizontal, lo que marca un periodo de disminución en las manifestaciones volcánicas que presentan basaltos de tipo acordonado, emitidos por fisuras ya que no se localizan aparatos volcánicos por los cuales hayan sido extruidos (INEGI, 1984 b).

Según la DGIAI (1983), La secuencia que constituye la Formación Comondú no muestra fuertes deformaciones tectónicas; sin embargo, muestra un acentuado levantamiento epirogénico y un buzamiento de sus estratos ligeramente inclinados hacia el oeste.

La porción sureste de esta franja (Franja oriental), es por mucho una de las mejores estudiadas de la región de la Reserva de la Biosfera de El Vizcaíno, esto debido a que el área de Santa Rosalía fue durante muchos años uno de los principales centros de producción de cobre del mundo (Mina el Boleo), así como por los estudios realizados por parte de CFE, en el área volcánica de la Reforma y de las Tres vírgenes debido al interés que existe como campo geotérmico. Estos últimos inician por parte de CFE en 1984 con el estudio geológico, geoquímico y geofísico, que justificaron la perforación del primer pozo exploratorio LV-2. En una segunda etapa (1988) se realizaron nuevos estudios, enfocados a la comprensión de la estructura geológica del sistema hidrotermal para lo cual se han perforado a la fecha siete pozos los cuales han permitido elaborar planos y esquemas de las estructuras geológicas en el subsuelo en los cuales se puede apreciar la complejidad estructural de la región y de cómo ésta es fundamental para entender el emplazamiento de los acuíferos.

Según García-Estrada y González-López (1998), el campo geotérmico de Las Tres Vírgenes se encuentra en una cuenca NW-SE tipo graben delimitada por fallas normales que afectan al basamento granodiorítico. Los mismos autores mencionan que la cadena de volcanes de dirección NE-SW ocupa la parte más baja de la depresión regional, pero se sitúan sobre un pilar (horst) local del basamento, que junto con otros de menor tamaño actúan como barreras hidrológicas que determinan la dirección del flujo de fluidos dentro del sistema hidrotermal.

Las Rocas más antiguas corresponden a una granodiorita de 91 Ma que aflora en el arroyo Yaqui. Sobre estas se encuentra una secuencia volcano-clástica dividida en dos partes principales, que corresponden a la Formación Comondú y a la Formación Santa Lucia. Los productos volcánicos de ambas unidades son los remanentes de una cadena de estratovolcanes ubicada en la porción oriental de la península. Estos productos se asocian con la estructura

caldérica de Santa Rosalía (López-Hernández, 1998). En esta región se emplazaron tres importantes centros volcánicos durante el Cenozoico: La Reforma, El Aguajito y el complejo de Las Tres Vírgenes. Su emplazamiento estuvo controlado por un conjunto de fallas normales regionales, de dirección NW-SE escalonadas de SW a NE (descendientes hacia la costa), y basculadas al SW (fallas: La Virgen, El Azufre, El Viejo), resultado de la deformación tectónica que origino la separación de la península durante la apertura del Golfo de California (López-Hernández, 1998). Como resultado de esta actividad tectónica se formo la cuenca de Santa Rosalía (depresión tectónica NW-SE) la cual fue invadida por el mar, acumulándose sobre la paleotopografía de la Formación Santa Lucia, las Formaciones del Boleo, La Gloria, El Infierno y Santa Rosalía.

En la zona del campo geotérmico la distribución de estos sedimentos estuvo controlada por la falla El Viejo que funcionó como una barrera para la depositación ya que no se encuentran sedimentos al SW de dicha estructura.

Durante la depositación y posiblemente a causa de los esfuerzos extensionales se emplazaron dentro de la cuenca 2 centros eruptivos (605 Ma) que se comportaron como islas volcánicas (López-Hernández, *et al.*, 1991) y corresponden al núcleo de las sierras de Reforma y Aguajito.

A principios del Plioceno ocurrió un cambio en el régimen tectónico, se inició un episodio de fallamiento lateral dextral orientado NNW que reactivó a las estructuras anteriores y se generaron nuevas estructuras de tipo extensional. Este fenómeno se asocia a los eventos que generaron la migración de la península hacia el NW.

En esta etapa la actividad volcánica de La Reforma se intensificó hace 3.5 Ma. Se inició la formación de un criptodomo generado por una intrusión que levantó a las rocas graníticas (Walker *et al.*, 1993) del Cretácico, hasta 800 m sobre sus alrededores.

Hace 0.7 Ma, los esfuerzos tectónicos hicieron que la actividad eruptiva se desplazara hacia el NW reactivándose el volcanismo en Aguajito. Posteriormente ocurrió un levantamiento de origen magmático similar al de Reforma y de menor magnitud. El empuje vertical fue más acentuado al SW provocando el deslizamiento de grandes bloques y el basculamiento tal como se observa en el cañón El Azufre. La actividad volcánica finalizó hace 0.5 Ma con el emplazamiento de las andesitas de Aguajito y pequeños domos dacíticos al sur del complejo (López-Hernández *et al.*, 1989).

La acumulación de sedimentos en la cuenca de Santa Rosalía fue interrumpida periódicamente por movimientos tectónicos y emersiones locales de origen volcánico que se manifestaron en cambios en el estilo de depositación. Ambos centros volcánicos permanecieron rodeados por el mar hasta hace 1 Ma cuando la línea de costa se retiró primero en la zona de Reforma y más recientemente en su porción NW (W de Aguajito) donde se encuentran evidencias de transgresiones muy recientes en los canales más bajos cerca del rancho San Alberto. En los márgenes de estos complejos los productos volcánicos se interdigitan con depósitos marinos a excepción de los materiales volcánicos con edades menores que 0.8 Ma.

La deformación regional asociada con el desplazamiento de la península fue contemporánea con la actividad volcánica. En la zona, al final del ciclo de Aguajito, se inició el desarrollo de un sistema *pull apart*, común es este tipo de tectónica. Las fallas La Virgen y El Azufre actuaron como los componentes de un esfuerzo de cizalla (Tessier, 1990). Debido a este fenómeno las fallas antes mencionadas se reactivaron con movimientos dextrales y se generó un sistema de fallamiento perpendicular de tipo transtensional de dirección NNE-SSW y' NE-SW que propició el emplazamiento de los volcanes de Las Tres Vírgenes (El Viejo/El Partido, El Azufre y La Virgen) y dio lugar a fallas como El Cimarrón.

Desde el punto de vista estructural el sistema más importante es el conjunto de fallas regionales de dirección NW-SE (fallas: El Azufre, El Volcán, El Viejo y El Partido), las tres últimas basculadas al SW. Se estima que afectan desde la formación Santa Lucía hasta el basamento granodiorítico y se encuentran cubiertas por los depósitos volcánicos y epiclásticos más recientes. El proceso de *pull apart* originó fallas normales u oblicuas de dirección NNE-SSW y NE-SW que no son visibles en superficie, pero juegan un papel muy importante porque en conjunto con las fallas antes mencionadas generaron un sistema de fracturas en el basamento granodiorítico donde se almacenan los fluidos hidrotermales.

Por su parte Angelier *et al.*, (1981), mencionan que desde el punto de vista estructural, la cuenca de Santa Rosalía a registrado las principales fases de la evolución tectónica del noroeste de México, durante el Neógeno y el Cuaternario, así como la emersión cuaternaria de la cuenca manifestada por un registro excepcional de una serie de terrazas marinas pleistocénicas (Ortlieb y Colletta, 1984).

Durante el Mioceno, varias fallas normales NW-SE cortaron el substrato volcánico (Grupo Comondú) de la cuenca, provocando una fragmentación en bloques; este episodio de extensión NE-SW corresponde al inicio del sistema de "Basin & Range" en el suroeste de Estados Unidos, y a la instalación de un Proto-golfo de California (Karig y Jensky, 1972). Posteriormente, cerca del límite Mioceno-Plioceno, apareció un régimen compresivo casi N-S, marcado por deslizamientos dextrales y por una reactivación de fallas normales anteriores; esta fase esta ligada con el principio de la actividad transformante del Golfo de California. Desde entonces, en el Plio-cuaternario, los movimientos deslizantes y extensivos coexisten en la región; las fallas mas recientes de la cuenca de Santa Rosalía, que afectan los terrenos pliocénicos y pleistocénicos, son de dos tipos, normales y deslizantes, o bien de tipo mixto. Aunque las formaciones sedimentarias neógenas de la cuenca de Santa Rosalía (Boleo, Gloria, Infierno) hayan sido separadas por fases de emersión, y que estén ligeramente discordantes una sobre la otra, parece que durante el depósito de éstas no se registraron movimientos verticales importantes. En particular, es de notarse que después del depósito de la Formación Boleo, las líneas de costa marcando el avance máximo del mar contemporáneo del depósito de las Formaciones Gloria, Infierno y Santa Rosalía son muy cercanas. Sin embargo, esta permanencia de los límites de la cuenca sedimentaria, hasta el depósito de la Formación Santa Rosalía, no puede interpretarse, de una manera precisa en términos de movimientos

verticales, hasta que se conozca exactamente la edad de los depósitos y la posición del nivel marino en cada época del Plioceno y del Pleistoceno Temprano.

En cambio, desde el final del Pleistoceno Temprano, una emersión generalizada de la cuenca y de la región de La Reforma, a sido manifiesta. Afloramientos de la Formación Santa Rosalía se observan actualmente a alturas variando de +170 a +340 m, de tal forma que constituyen los depósitos cuaternarios marinos más elevados de la región del Golfo de California. Como lo indica una serie de terrazas marinas, regularmente escalonadas en la zona costera, este levantamiento del área no fue drástico, sino que a sido progresivo, posiblemente con tasas variando en el transcurso del tiempo (Ortlieb, 1981) Estos movimientos verticales están relacionados esencialmente con la historia volcano-tectónica de la caldera de La Reforma (Demant y Ortlieb, 1981; Demant, 1981, 1984).

Ortlieb y Colletta, (1984), mencionan que de acuerdo al conocimiento actual de la evolución climática, permite considerar que desde final del Pleistoceno Temprano, existió una docena de transgresiones ligadas a períodos de alto nivel marino (interglaciares), tal como lo evidencia la existencia de al menos nueve terrazas marinas en el área de Santa Rosalía, y no dos como lo describió Wilson (1948). Los mismos autores mencionan de acuerdo a una correlación cronoestratigráfica de las terrazas, la cuenca de Santa Rosalía se a estado levantando con una tasa de cerca de 260 mm/10³ años desde hace aproximadamente 1 millón de años hasta 300,000 años, y después con una tasa del orden de 130 mm/10³ años hasta la actualidad.

Freiberg, (1979; 1981; 1983), menciona que la actividad volcánica del campo geotérmico de las Tres Vírgenes jugo un papel crucial en la evolución sedimentaria y en los movimientos verticales de la cuenca de Santa Rosalía.

Franja central Sinclinal Californiano, integra la unidad geomorfológica de Llanura, y estructuralmente conforma a la subcuenca de Vizcaíno (Fig. 11) (Mina,1957; Lozano, 1976), cuyo relleno es de rocas sedimentarias, Cenozoicas y algunas del Mesozoico que cubren a profundidad el contacto entre el terreno Cochimi y Yuma, y las cuales a su vez se encuentran cubiertas en su mayor parte por los depósitos cuaternarios, que impiden detectar en superficie las evidencias estructurales que afectan esta franja.

Mina (1957), en la subcuenca de Vizcaíno, identifico en el subsuelo al norte de la laguna San Ignacio la Formación Valle, la cual cubre a los subterrenos tectonoestratigráficos Vizcaíno Norte y Vizcaíno Sur, y cuyos únicos afloramientos en superficie se encuentran al oeste en la península de Vizcaíno desde Punta Eugenia a Punta Abrejos (franja occidental). En superficie las evidencias de rocas sedimentarias que rellenan la subcuenca del Vizcaíno, corresponden a la Formación Bateque, Formación San Ignacio y Formación Almejas, cuyos afloramientos se encuentran dispersos, restringidos y de poca extensión entre la laguna San Ignacio y Ojo de liebre.

Según CRM (1999), las rocas sedimentarias que constituyen esta estructura presentan

muy poca deformación, la cual disminuye casi totalmente hacia el sur del estado, tal como lo atestigua el paquete sedimentario del Mioceno, en especial la Formación San Raymundo y Monterrey que presentan plegamientos locales muy intensos, que disminuyen su intensidad en localidades relativamente cercanas hasta desaparecer en otros sitios donde los estratos permanecen horizontales, lo que infiere que el plegamiento de estas secuencias fue causado por una tectónica gravitacional durante un levantamiento regional (INEGI, 1984d, b).

La deformación de las rocas sedimentarias se evidencia en la Formación Almejas que aflora al poniente de la laguna San Ignacio y al suroeste de la laguna Ojo de Liebre, en contacto erosional y discordancia angular con las Formaciones Valle y Bateque, y cuyos estratos presentan rumbos que varían de N30° -56° W con inclinación de 3° al NE, estos estratos en el área de Bahía Tortugas (franja occidental), presentan inclinaciones de hasta 65° y discordancia paralela y angular de bajo ángulo sobre la Formación Tortugas, del Mioceno, y las formaciones Eugenia y Valle, del Cretácico, lo cual indica que una parte importante de los movimientos tectónicos a que a estado sujeta esta parte de la cuenca de Vizcaíno se efectuó en el Plioceno Tardío (CRM, 1999).

Otras evidencias de la geología estructural, según INEGI (1984d), se puede inferir en el borde occidental de las mesas Las Salinas, Las Gallinas y la Cordillera, al este de la laguna San Ignacio, ya que el alineamiento de estas mesas está acompañado de vetillas de yeso que son oblicuas a la estratificación lo cual permite inferir un fallamiento tensional ENE-WNW. La misma fuente menciona que en el llano El Coyote se localiza otra falla del mismo tipo con rumbo ENE-WNW, que corta sedimentos de la Formación Valle Salitral del Cretácico Superior, el salto estratigráfico se desconoce para estas dos fallas.

Para el Cuaternario como se a mencionado en la descripción de la franja oriental (Sierras Altas) ocurren varios eventos volcánicos de carácter basáltico-explosivo que se deben a la continua deriva de la península. Así como una subsidencia en las cuencas de Vizcaíno y Purísima Iray, donde se depositaron durante el Plioceno Superior los sedimentos correspondientes a la Formación Almejas y Salada, respectivamente, y en donde la presencia de terrazas marinas de las lagunas de San Ignacio y la Escondida apoyan y atestiguan un período de continuos levantamientos con el consecuente retiro de los mares (INEGI, 1984b). De acuerdo a la distribución y a las características litológicas y estructurales de las unidades de rocas descritas en la franja occidental (Sierras bajas) y oriental, (Sierras altas), se infiere una geología estructural más compleja que la descrita anteriormente para el Sinclinal Californiano, el cual CNA (2002), refiere como acuífero 302 Vizcaíno (Fig. 3 del Capítulo II), cuyas evidencias estructurales, se presupone se encuentran cubiertas en su mayor parte por depósitos Cuaternarios que conforman en superficie a la unidad geomorfológica de llanura. Lo anterior se apoya en las evidencias que permiten reconocer dos fases tectónicas principales de deformación que han afectado la región de la Reserva de la Biosfera de El Vizcaíno. Una compresiva al occidente en los inicios del Cretácico Superior que metamorfizó la secuencia del arco magmático en el Bloque tectónico mesozoico, y una distensiva al oriente que dio

origen al Cinturón Volcánico miocénico la cual esta relacionada con La deformación regional asociada a la apertura del Golfo de California y el desplazamiento de la península hacia el NW, en donde los trabajos estructurales de autores como Kimbrough, 1982; Sedlock et al., 1993; Castro-Leyva et al., 2001, permiten tener un panorama más realista de la complejidad en la franja occidental. Lo cual queda evidenciada con mayor detalle en el área de las Tres Vírgenes (franja oriental), con los trabajos geofísicos de García-Estrada y González-López(1998); Bigurra-Pimentel (1998); Palma-Guzmán (1998), que les permitió identificar un sistema de fallas NE-SW que no son visibles en superficie y que se encuentran asociadas al proceso de *pull apart* que originó fallas normales u oblicuas de dirección NNE-SSW.

La importancia de destacar el detalle de la geología estructural cobra importancia practica en la hidrología subterránea, ya que permite en principio tener una perspectiva real de la geometría de los acuíferos, así como de los aspectos litológicos (tipo de roca o depósito, porosidad, permeabilidad, transmisibilidad) y por consiguiente el volumen flujo y calidad de agua que contienen. De este último es de destacar los cambios de facies en la Cuenca del Vizcaíno que atestiguan depósitos asociados a sedimentación de ambientes marino, continental y mixto en diferentes épocas (Mesozoico al Cuaternario) y cuyo flujo del agua subterránea a través de estos tiende a modificar sus características químicas y por consiguiente su calidad.