

ESTUDIO DE RIESGO GEOLÓGICO EN TIJUANA, BAJA CALIFORNIA CON BASE EN RASGOS ESTRUCTURALES Y LA RESPUESTA DEL TERRENO

Luis A. Delgado-Argote, Alejandro Hinojosa-Corona, Manuel Aragón-Arreola y Víctor M. Frías-Camacho

Departamento de Geología, División de Ciencias de la Tierra, CICESE

Km. 107 Carretera Tijuana-Ensenada, C.P. 22860, Ensenada, Baja California, México.

E-mail: ldelgado@cicese.mx

RESUMEN

La Ciudad de Tijuana se localiza en una zona tectónicamente activa y se asienta sobre sedimentos del Terciario pobremente consolidados de las Fms. San Diego y Lindavista que descansan sobre rocas cristalinas del Cretácico.

El riesgo geológico en la ciudad depende de la asociación de rasgos estructurales (fallas y fracturas), litológicos, la pendiente del terreno y la sismicidad. En este trabajo se estimó la influencia de los tres primeros factores a escala regional y local (respuesta de sitio). La estimación de riesgo regional (1:75,000) se basó en la fotointerpretación geológica, modelos digitales de elevación y la geología regional publicada. Los datos se manejaron mediante un sistema de información geográfico y la evaluación de detalle se efectuó con base en la fotointerpretación a escala 1:15,000 y 1:30,000, medición de pendientes y cartografía geológica (1:2,000).

De la evaluación regional se discriminaron sitios que, en su mayoría, coinciden con áreas donde se ha observado deslizamiento, obien, existen evidencias de ruptura. Por su distribución geográfica, los sitios de mayor riesgo, definidos por pixeles de 80 por 80 m, se localizan a lo largo de los taludes cercanos de la Mesa de Otay, en el norte de la ciudad, y en las laderas y zonas de fuerte pendiente de los lomeríos intensamente bisectados por el drenaje de la porción SW de la ciudad. Las zonas de menor riesgo se localizan hacia el oriente, donde los depósitos del Terciario son reducidos o bien, afloran rocas cristalinas.

Se obtuvieron mapas de zonificación de riesgo en las áreas El Patejé, El Pato y Cañada Verde-Sánchez Taboada, lugares donde se produjeron deslizamientos que afectaron a la población. La zonificación se hizo a partir de Valores Empíricos de Riesgo, los cuales resultan del producto aritmético del valor de la pendiente por la densidad de fracturas y fallas por área, cuya validez ha sido probada durante dos años de observación. Es importante que, independientemente de la edad o actividad de las fallas y fracturas, éstas trabajarán como planos potenciales de deslizamiento en presencia de un "disparador" que puede ser el agua o la vibración. Las zonas trabajadas con detalle coinciden con las encontradas en el análisis regional.

El uso de los mapas de zonificación permite discriminar rápidamente a aquellas zonas donde el desarrollo urbano es favorable, lo que finalmente facilita la planeación urbana.

INTRODUCCIÓN

En 1992, a raíz de los deslizamientos de terreno ocurridos en la zona El Patejé, en el cañón se efectuó un trabajo de detalle en el que se levantaron secciones estratigráficas y geología de campo a escala 1:2,000. Se observó en esa ocasión, que los accidentes estaban influenciados principalmente por los factores de pendiente y densidad de fracturamiento asociado con fallas regionales. Se observó además que los fenómenos de ruptura son independientes de la edad del sistema estructural, el cual se estima activo en la región por simple asociación con estructuras activas del Condado de San Diego (fallas Rose Canyon y La Nación), y porque las estructuras se desarrollan sobre la Fm. San Diego, de aproximadamente un millón de años (1 Ma).

Este estudio se inició para conocer las características estructurales de los deslizamientos en áreas las de El Patejé, Cañón El Pato y la Colonia Sánchez Taboada. Estos ocurrieron

durante y después de las lluvias extraordinarias ocurridas en Tijuana entre los meses de enero y marzo de 1993. Se tienen reportes de otros sitios con problemas similares en diferentes zonas de la ciudad; sin embargo, por las dimensiones de las áreas, y de acuerdo con los reportes recibidos por la Unidad Municipal de Protección Civil de Tijuana, se decidió trabajar a detalle solo en las áreas mencionadas. Estos sitios son puntos de control para extrapolar los factores de inestabilidad a nivel regional y eventualmente caracterizar el riesgo de la ciudad entera.

Para la identificación de zonas potencialmente vulnerables en la ciudad, se efectuaron interpretaciones de fotografías aéreas a escalas aproximadas de 1:75,000 (INEGI, 1990), 1:30,000 (INEGI, 1973) y 1:15,000 (Carlos Ceseña, 1993). Del uso de la primera escala se obtiene una visión sinóptica de los rasgos estructurales regionales que pueden correlacionarse con el marco tectónico. Las fotografías a menor escala permiten discriminar rasgos particulares, sobre todo de fracturamiento en las zonas

más densamente pobladas y de antiguas cabeceras de deslizamiento.

Con la finalidad de mostrar la relación entre el ambiente tectónico regional y la deformación a la escala de, por ejemplo, una colonia, en este trabajo se describen el marco tectónico de referencia, un análisis geomorfológico donde se resalta su correlación estructural, la geología de detalle de las áreas El Patejé, El Pato y Cañada Verde-Sánchez Taboada, y una síntesis del análisis de riesgo para cada una de las áreas. Finalmente se presenta una propuesta para trabajos futuros en los que se señalan algunas variables físicas importantes que definen con mayor precisión la vulnerabilidad.

Este trabajo presenta zonas potencialmente vulnerables a dos escalas. A nivel local se considera que la precisión es bastante adecuada para la estimación del grado de riesgo en predios. A escala regional, las zonas de riesgo representan áreas en las que se requiere mayor detalle para llegar a una adecuada validación de riesgo geológico. Algunos de los sitios identificados como riesgosos ya han sido urbanizados y en ellos se requiere un monitoreo constante para evitar que algún factor en especial actúe como disparador de un proceso que provoque daños a la población.

Dada la importancia de los factores estructurales, morfológicos y geohidrológicos en la evaluación de los riesgos geológicos en Tijuana, se sugiere que la ciudad cuente con su propio personal especializado en la materia, esto es, uno o dos geólogos que se encarguen de dar seguimiento y monitoreo a las zonas de alto valor de riesgo y a los nuevos sitios en los que se identifiquen este tipo de fenómenos. En otras ciudades del mundo, el geólogo municipal, geólogo del condado o geólogo estatal, ha tenido un papel importante en la planificación urbana.

MARCO GEOLÓGICO REGIONAL DE TIJUANA

TECTÓNICA

Una de las premisas principales de este trabajo se refiere a la identificación de la zona de Tijuana como tectónicamente activa. De acuerdo con Legg y colaboradores (1991), esta región está incluida en la Zona de Cizallamiento del Sur de California (Southern California Shear Zone), cuyos límites están marcados por la Zona de Falla San Andrés en el oriente, el Bloque de Sierras Transversas Occidentales (Western Transverse Ranges Block) en el norte, el Sistema de la Falla San Clemente en el occidente y la Falla Agua Blanca en el sur (Figura 1). Según los autores anteriores, esta amplia zona está rotando en sentido opuesto al de las manecillas del reloj. Sobre la edad de estas estructuras, Teng y Gorsline (1991) señalan que las cuencas de la margen continental recibieron el mayor aporte de sedimentos durante un período de rápida subsidencia en el Plioceno-Holoceno (últimos 10,000 años), lo cual apoya el concepto de zona tectónicamente activa.

Con respecto al marco tectónico, Tijuana se localiza a 60

km al oriente del Sistema de la Falla San Clemente y, entre este sistema y la costa, se encuentran en arreglo casi paralelo (N30°-40°W) las fallas Depresión San Diego (San Diego Trough), Banco Coronado, Descanso y en la costa, la Falla Rose Canyon, todas con desplazamiento lateral derecho. Con excepción de la última, las estructuras en el borde continental han sido identificadas por medio de estudios de sismicidad y de perfiles sísmicos de reflexión que muestran desplazamientos en sedimentos superficiales no consolidados y en abanicos sedimentarios del Cuaternario (Legg, 1985). En la zona continental, entre San Diego y Tijuana, se considera que las complejidades tectónicas resultan de la interacción de la zona de falla San Miguel-Vallecitos con la zona de falla Rose Canyon, las cuales, se ha inferido que están conectadas a profundidad (Brune *et al.*, 1979; Legg y Kennedy, 1979; Suárez-Vidal *et al.*, 1991). Esta última zona de falla es activa (está documentado un sismo de 4.9 en 1986; Fisher y Mills, 1991), y se estima que actualmente muestra un desplazamiento del orden de 1 a 1.8 mm/año (Fisher y Mills, 1991; Berger y Schug, 1991), se conecta con las fallas de Inglewood y Newport hacia el norte (Fisher y Mills, 1991), y en algunos sitios del Condado de San Diego, esta zona de falla muestra desplazamientos mínimos de 8.7 m en sedimentos aluviales del Holoceno medio (Rockwell *et al.*, 1991).

Hacia el sur del centro de San Diego, la Zona de Falla Rose Canyon se abre en tres segmentos que, del mar hacia la bahía se conocen como fallas Spanish Bright, Coronado y Silver Strand (Rockwell *et al.* 1991). Berger y Schug (1991) consideran que esta zona de falla tiene potencial para producir un sismo de magnitud mayor de 6.

ESTRATIGRAFÍA

El registro estratigráfico en el área de Tijuana define un período de aproximadamente 120 Ma. Las rocas que definen este período, se pueden dividir en dos grandes grupos. El primero, constituido por las rocas cretácicas de las Fms. Alisitos y Rosario, y el segundo, formado por las rocas terciarias y cuaternarias de las Fms. Rosarito Beach, San Diego y Lindavista. Algunos depósitos recientes sobreyacen a las rocas de este último grupo.

ROCAS CRETÁICAS

Las rocas cretácicas que constituyen la base del registro estratigráfico en el área de Tijuana, son parte de las Fms. Alisitos y Rosario. Estas rocas no afloran en el área, de estudio pero se han identificado en algunos pozos de agua del Condado de San Diego (Minch, 1967) y hacia el oriente de localidad. La Fm. Alisitos (Aptiano-Albiano) es una secuencia volcanosedimentaria que aflora a lo largo del extremo occidental del Estado de Baja California. Es parte del arco volcánico que se desarrolló durante el Cretácico. Incluye derrames andesíticos, depósitos piroclásticos, lodolitas y algunas facies calcáreas. Estas últimas, afloran hacia el sur de la Falla de Agua Blanca (Gastil *et al.*, 1975). Las rocas de la Fm. Alisitos forman el basamento cristalino de Tijuana. Descansan discordantemente

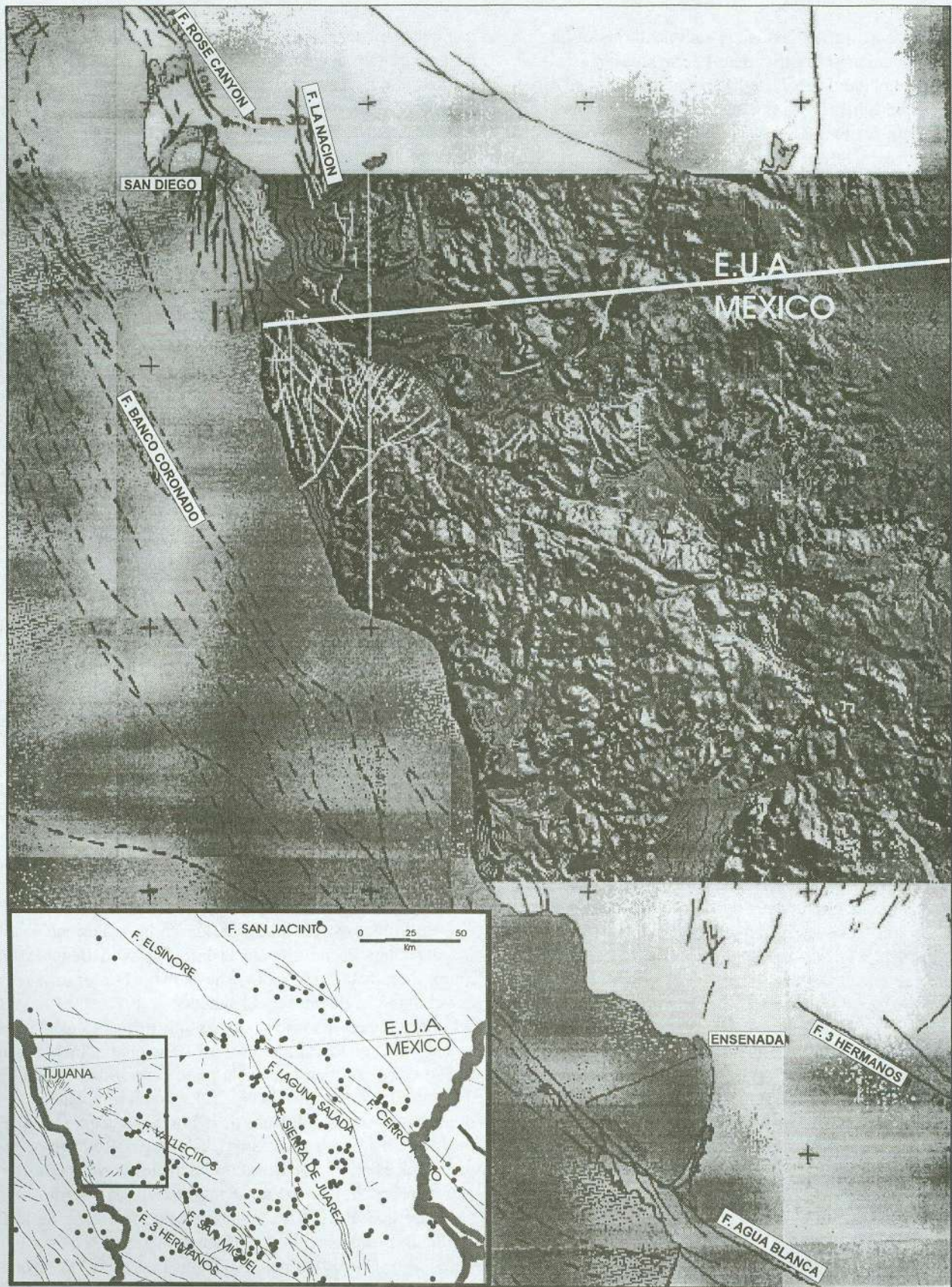


Figura 1. Marco tectónico del NW de Baja California que muestra las fallas regionales en el continente y borde continental. La imagen insertada se obtuvo a partir de la base digital de elevaciones. Se indican las principales fallas en el Área de Tijuana. En el recuadro inferior se presentan los epicentros registrados por RESNOM (CICESE) durante el segundo semestre de 1992.

sobre este basamento los depósitos sedimentarios de la Fm. Rosario (Campaniano-Maastrichtiano), formados por areniscas, lutitas y conglomerados (Beal, 1948). El material detrítico deriva de las rocas volcánicas y graníticas de los terrenos ubicados hacia el oriente. La Fm. Rosario define un período de relativa calma tectónica durante el Cretácico tardío.

Rocas Terciarias y Cuaternarias

Las rocas del Mioceno medio de la Fm. Rosarito Beach, las del Plio-Pleistoceno de la Fm. San Diego, las del Pleistoceno de la Fm. Lindavista y algunos depósitos recientes, completan el registro estratigráfico en el área de Tijuana. A diferencia de las rocas cretácicas, todas estas unidades afloran en el área. Hacia el oriente, estos depósitos del Neógeno y Cuaternario, se acuñan contra las rocas batolíticas y prebatolíticas de las Sierras Peninsulares; hacia el occidente, están delimitados por la línea de costa actual, aunque pueden observarse en las Islas Coronado al occidente de Tijuana (Ashby, 1989). Estos límites definen la Cuenca de Rosarito Beach, la cual dividió Ashby (1989) en las subcuenca La Misión y Tijuana (Figura 2). La parte central de esta última, constituye lo que aquí se denomina área de Tijuana.

La Fm. Rosarito Beach es una secuencia constituida principalmente por basalto, tobas y sedimentos tobáceos del Mioceno medio (Minch, 1967; Ashby, 1989). Originalmente, se describieron cinco miembros en esta formación (Minch, 1967), y posteriormente, se añadieron cinco más, al incorporar a ésta, los miembros que afloran en la zona de La Misión (Ashby, 1989). De los diez miembros, cinco afloran en la Subcuenca Tijuana y cinco en la Subcuenca La Misión (Figura 2; Ashby, 1989). Los ambientes de depósito de la Fm. Rosarito Beach, varían entre no marinos (fluviales y lacustres) a marinos someros de plataforma abierta (Minch *et al.*, 1984; Ashby, 1989). Esta formación sobreyace en forma discordante a las rocas de la Fm. Rosario (Minch, 1967; Flynn, 1970; Ashby, 1989). En algunos sitios fuera del área de Tijuana, descansa discordantemente sobre depósitos conglomeráticos del Eoceno (Minch, 1967; Flynn, 1970). Su origen está estrechamente ligado a la deformación transtensional de la Plataforma Continental de California y Baja California, durante el Oligoceno tardío y el Mioceno temprano a medio (Minch, 1967; Deméré, 1983; Minch *et al.*, 1984; Ashby, 1989). Este es un período caracterizado por una actividad volcánica intensa y deformación en la plataforma continental. Para los fines de este estudio en la porción sur de la ciudad se puede considerar a las rocas basálticas de la Fm. Rosarito como el basamento (roca firme), mientras que, por correlación con las observaciones de Minch (1967) en el Condado de San Diego, el basamento en la porción norte de la ciudad estaría representado por la Fm. Alisitos.

Durante el Plio-Pleistoceno se depositó la Fm. San Diego. Esta es una secuencia sedimentaria depositada durante una fase transgresiva de la Cuenca de San Diego (Deméré, 1983), la cual fué posteriormente redefinida por Ashby (1989) como Subcuenca de Tijuana (Figura 2). Esta subcuenca, al igual que otras cuencas a lo largo de las costas de California y Baja California, está estructuralmente relacionada a la actividad

tectónica transtensional que se dio en la plataforma continental durante el Oligoceno tardío y el Mioceno temprano-medio (Minch, 1967; Deméré, 1983; Minch *et al.*, 1984; Ashby, 1989). Los depósitos de la Fm. San Diego incluyen arenas y conglomerados derivados de las rocas del basamento y rocas sedimentarias pre-existentes, inmediatamente hacia el este de la Subcuenca Tijuana (Gastil *et al.*, 1975). De acuerdo con los diferentes autores que la han estudiado (Gunther, 1964; Minch, 1967; Kennedy y Tan, 1977; Deméré, 1982, 1983), esta formación se divide en dos miembros: (1) un miembro inferior, marino, constituido principalmente por arenas finas, y (2) un miembro superior de arenas gruesas y conglomerados. Gran parte de este segundo miembro es continental, lo que indica que la cuenca fué haciéndose cada vez más somera conforme iba rellenándose (Deméré, 1983). La Fm. San Diego se depositó desde principios del Plioceno tardío (3.0 Ma) hasta el Pleistoceno temprano (1.5 Ma). Las arenas y conglomerados de la Fm. San Diego, en el área de Tijuana, descansan discordantemente sobre basalto y tobas del Miembro Costa Azul de la Fm. Rosarito Beach (Minch, 1967; Valentine y Rowland, 1970; Ashby y Minch, 1984). En áreas como la de El Pato, la Fm. San Diego incluye tobas retrabajadas derivadas del miembro anterior.

Sobreyacen discordantemente a la Fm. San Diego las areniscas y conglomerados de la Fm. Lindavista del Pleistoceno y Reciente, estos depósitos están constituidos principalmente por material metavolcánico de color café-rojizo. De acuerdo con Minch (1967) y Gastil *et al.* (1975), afloran al sur de la Cuidad de Tijuana, donde se encuentran coronando los cerros y mesas. En general, estos depósitos no contienen fósiles (Minch, 1967).

Finalmente, algunas areniscas fosilíferas no consolidadas que incluyen algunos artefactos empleados por las culturas indígenas, así como algunos depósitos aluviales en los valles y al pie de los cerros, constituyen los depósitos más recientes en el área de Tijuana (Minch, 1967; Flynn, 1970).

En la Figura 2, se observa que en la Subcuenca Tijuana, los derrames de basalto de la Fm. Rosarito Beach afloran predominantemente desde La Joya hasta Punta Descanso, a lo largo del extremo occidental de la subcuenca. En esta misma zona, afloran, algunos depósitos marinos muy pequeños que se ponen en contacto con los basaltos del Mioceno medio. En la Figura 2 puede verse también que en la parte central de la Subcuenca Tijuana (donde se ubica la ciudad), afloran principalmente los depósitos poco consolidados de la Fm. San Diego. Hacia el SE de la ciudad, en las cercanías a la Presa Rodríguez, estos depósitos están en contacto con las facies fluviales de la Fm. Rosarito Beach. Aunque no se muestran en la Figura 2, en los sitios en que afloran las arenas y conglomerados de la Fm. Lindavista estos sedimentos coronan algunos cerros y mesas del sur de la Ciudad (Minch, 1967; Gastil *et al.*, 1975). Al oriente de la subcuenca Tijuana (fuera del área de Tijuana), afloran las rocas volcánicas de la Fm. Alisitos y las rocas graníticas del Batolito Peninsular. Los depósitos del Neógeno y del Cuaternario se depositan y acuñan sobre estas rocas cristalinas.

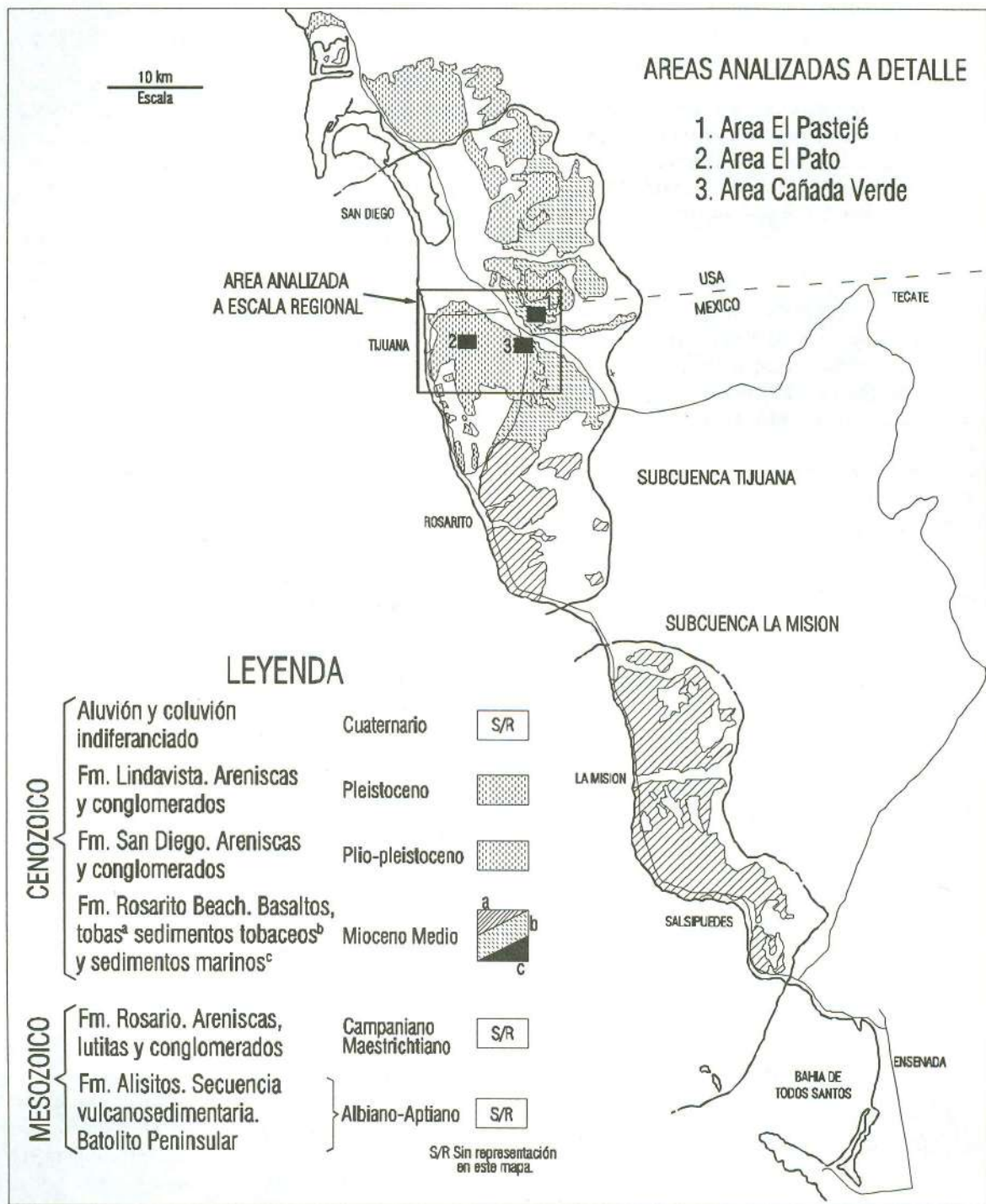


Figura 2. División del Área de Tijuana en subcuencas (Minch, 1967; Ashby, 1989) y columna estratigráfica del área estudiada. Se indican las zonas que fueron seleccionadas como sitios de prueba.

De la distribución de las rocas terciarias y cuaternarias se observa en la Figura 2, que la ciudad está edificada principalmente sobre depósitos muy jóvenes (3.0-1.5 Ma) y poco consolidados. La edad de estos depósitos, el tipo de sedimentos y el estado físico de los mismos, son en parte responsables de la inestabilidad de terreno (deslizamientos). Sin embargo, los factores sedimentológicos y estratigráficos no son los únicos que promueven la inestabilidad. Otros factores importantes que

deben considerarse en el futuro son: (1) el grado de saturación de agua en los sedimentos, (2) el patrón estructural del área, (3) la posible actividad sísmica y (4) aquellos inducidos por el hombre (asentamientos en pendientes pronunciadas y en los cauces de los arroyos, modificación de taludes, aporte de agua al subsuelo por tuberías en mal estado y letrinas, tipo de construcciones, etc.).

ANÁLISIS REGIONAL DE RIESGO GEOLÓGICO

Con base en la interpretación estructural de las fotografías aéreas escala 1:75,000 del INEGI, de 1990 convertidas a formato "raster", la base digital de elevación, la información litológica del INEGI 1978 escala 1:50,000 (Hoja Tijuana) y Minch (1967), se efectuó la evaluación de riesgo a escala regional.

METODOLOGÍA

La ubicación de las zonas de riesgo geológico implica la selección de todos aquellos sitios donde la pendiente del terreno es mayor a un cierto valor y además se encuentra, en o cerca, del trazo de una falla o fractura geológica en terreno sedimentario poco consolidado. La estimación del riesgo geológico a esta escala, es la conjunción de esos factores que previamente han demostrado ser importantes en la Ciudad de Tijuana (Delgado-Argote *et al.*, 1993), donde cada factor es manejado como una capa de información.

La localización de sitios que cumplen con los criterios de riesgo a nivel regional, se automatizó mediante el Sistema de Información Geográfico (SIG), denominado Sistema de Apoyo y Análisis Geográfico de Recursos (GRASS). Este SIG trabaja con información geográfica en niveles o capas de información, donde cada capa es discretizada en celdas. Cada capa la podemos interpretar como un mapa temático. Para localizar las zonas de riesgo en función de los factores mencionados, se proporcionan al SIG las tres diferentes capas de información para la región estudiada. Este esquema se muestra en la Figura 3. Una vez alimentada la información geográfica, el SIG puede ser interrogado para que busque todas aquellas zonas que satisfagan una definición ajustable de riesgo. En general, se definirá como zona de riesgo toda aquella que cumpla con la siguiente condición:

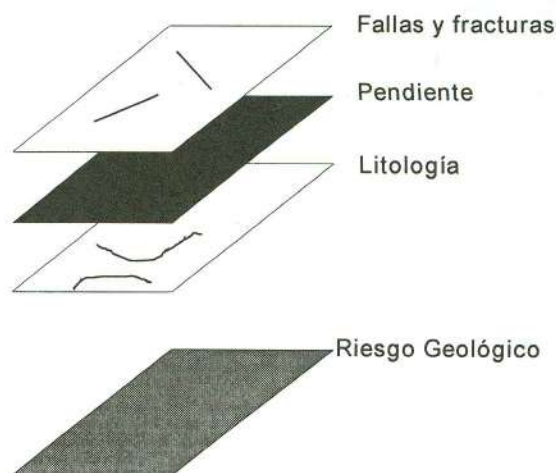


Figura 3. Capas de información empleadas en el Sistema de Información Geográfico GRASS (ver texto) para identificar zonas de riesgo a nivel regional en el Área de Tijuana, Baja California.

Si $Pendiente > umbral$ y existe falla o fractura y el terreno es incompetente entonces Riesgo,

donde el valor del umbral es empírico. El resultado de la aplicación de la fórmula anterior es cualitativo, asignando un valor verdadero (booleano) a todas aquellas celdas en las que se cumpla la condición, entendiéndose por terreno incompetente a aquel formado por rocas sedimentarias no consolidadas.

El dictamen sobre las zonas de riesgo está en función de la calidad y precisión de los datos (capas de información) y, obviamente, de la condición de riesgo (definición).

Para que los resultados sean válidos, debe existir correspondencia espacial entre las celdas de las diferentes capas de información. Esta correspondencia se establece por medio de la georreferencia de las fuentes de información, sometiéndola a un mismo contexto cartográfico tanto en la proyección como en el tamaño de la celda. La proyección cartográfica empleada fue la Universal Transversa de Mercator (UTM) y el tamaño de la celda para las capas de información geográfica dispuesta en forma de rejilla (raster), fue de 80 por 80 metros. Las fuentes de donde se obtuvo la información y el contexto cartográfico utilizados en el SIG se describen con detalle en Hinojosa-Corona *et al.* (1996).

Las capas de información de fallas Figura 4 y litología Figura 5, una vez calculadas, son invariantes. El parámetro que puede ser ajustable es el valor de umbral de la pendiente obtenido a partir de las Figuras 6 y 7. Todas aquellas celdas cuya pendiente sea mayor al umbral, serán candidatas a ser exploradas por falla y litología para determinar si son riesgosas. Para seleccionar un valor adecuado de umbral se observaron los valores de pendiente en zonas de control afectadas por deslizamientos. Hay que recordar que los valores de pendiente corresponden a celdas de 80 x 80 m que representan un valor suavizado (promediado).

La Figura 8 muestra una estimación regional de riesgo para la Ciudad de Tijuana utilizando un umbral de pendiente del 18% (10°). Al subir el umbral las zonas de riesgo se reducen y si establecemos un umbral menor, las zonas se incrementarán. Estimamos que el valor del 18% es representativo de la situación en Tijuana, ya que muestra todas las zonas afectadas conocidas. Al incluir la capa de litología (Figura 9) la estimación es más realista porque involucra la composición del terreno.

GEOLOGÍA DE DETALLE

La fotointerpretación estructural del área El Patejé se efectuó con fotografías aéreas en blanco y negro a escala aproximada 1:15,000; El Pato y Cañada Verde-Sánchez Taboada se interpretaron con fotografías en color a escala aproximada 1:30,000 de INEGI de 1973. Las fotografías más cercanas tienen mayor resolución y, por lo tanto, se pudo observar mayor detalle de fracturamiento y fallamiento. Tanto los rasgos de fallamiento como de fracturamiento, tienen el mismo valor en la

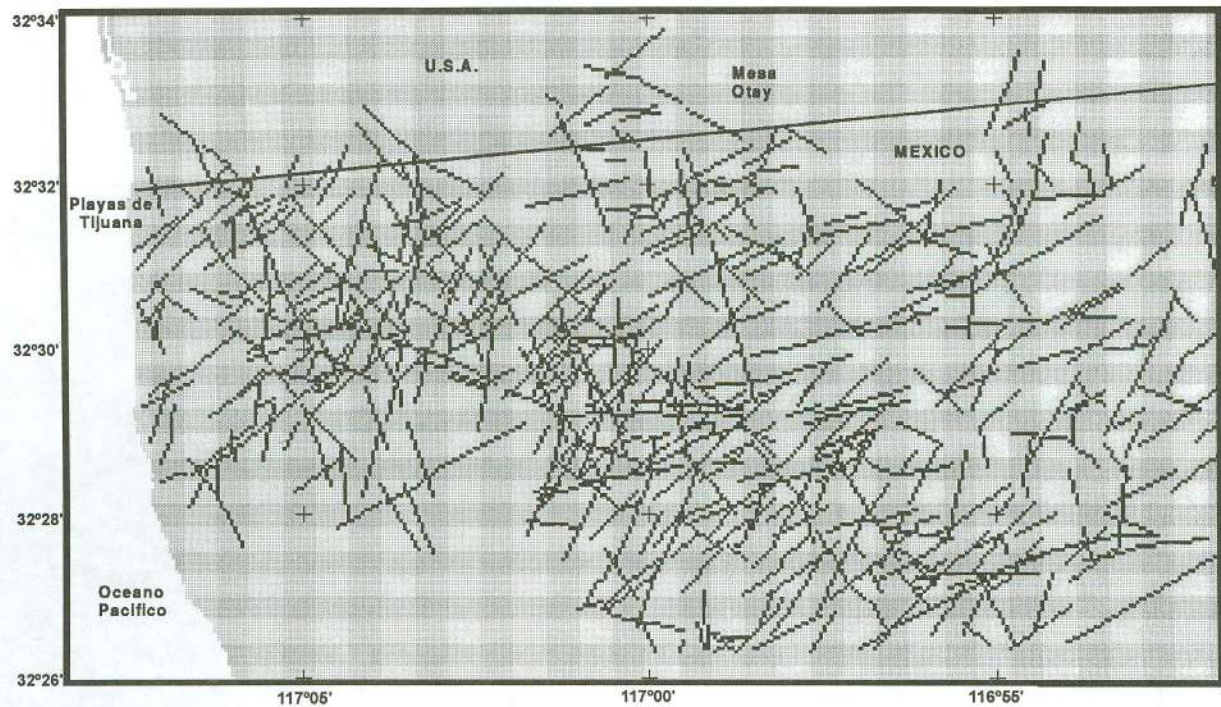


Figura 4. Interpretación estructural del Área de Tijuana a partir de fotografías aéreas escala 1:75,000 (INEGI, 1990). Las líneas blancas representan el trazo de los lineamientos en forma vectorial, los pequeños cuadros que les sirven de fondo constituyen el archivo de rejilla (raster) obtenido a partir de las estructuras.

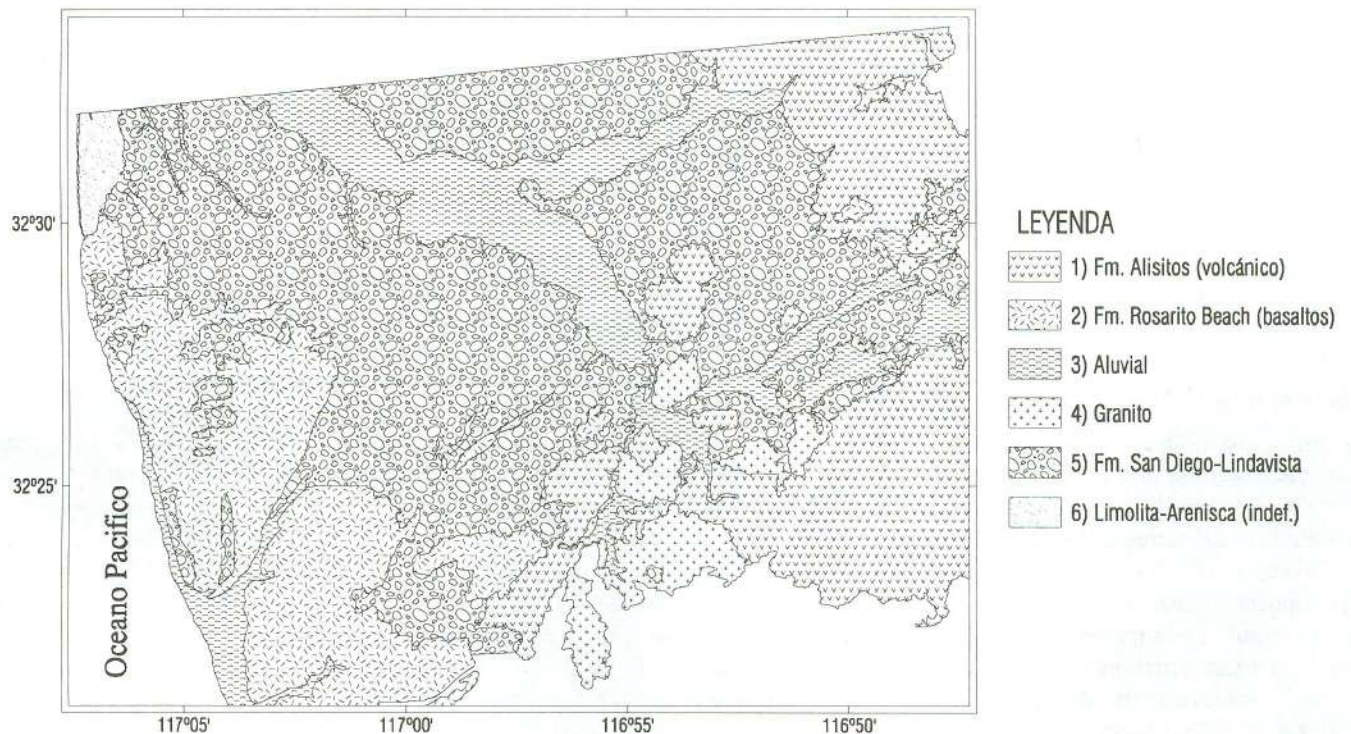


Figura 5. Mapa litológico simplificado del Área de Tijuana en el cual se distinguen dos tipos de clases litológicas: rocas cristalinas -competentes- (1,2 y 4) y unidades sedimentarias -incompetentes- (3,5 y 6) (tomado de la Carta Geológica 1:50,000 del INEGI y Gastil *et al.*, 1975).

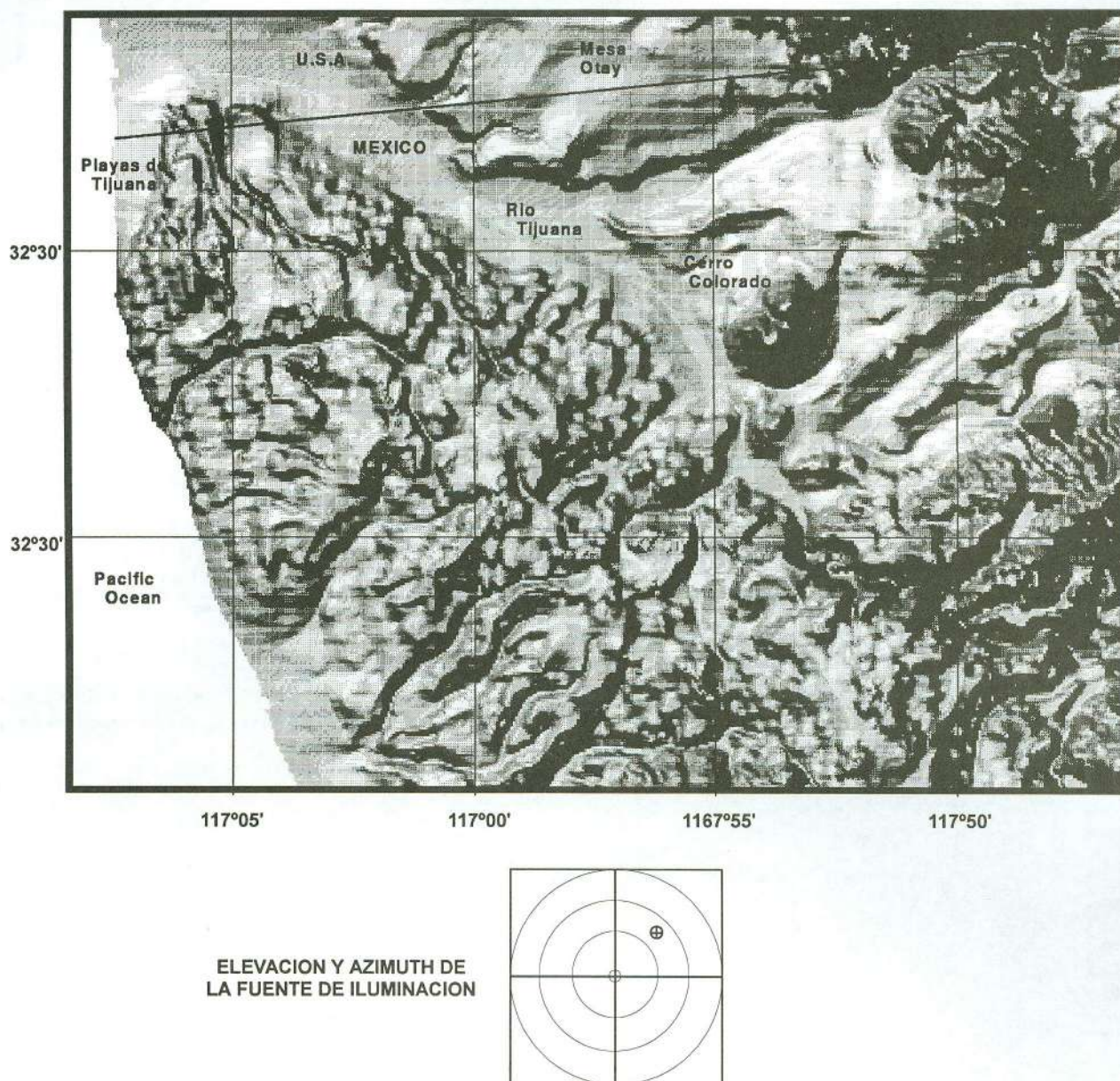


Figura 6. Modelo Digital de Elevación para el Área de Tijuana iluminado artificialmente desde el NW.

cuantificación de la densidad de estructuras en vista de que se parte de la premisa de que el factor pendiente combinado con un “plano de debilidad” (falla o fractura) determinarán la inestabilidad del terreno. Para cualquier propósito práctico, a escalas superiores de 1:10,000, la estratigrafía de la región tiene una respuesta similar ya que la consolidación de los sedimentos es baja o nula en la mayor parte de la región de estudio. La respuesta estará determinada parcialmente por la presencia de las unidades más estables de basaltos de la Fm. Rosarito Beach u otras unidades cristalinas más antiguas (Figura 5).

ÁREA EL PASTEJÉ

Las principales áreas afectadas en esta región se localizan en las partes internas del Cañón Libertad, entre el Mercado

Limón Río y la parte más alta del Arroyo Libertad. Se interpreta a este último como de origen estructural en un sistema orientado preferencialmente ENE, con un marcado arreglo en zig-zag del cauce del arroyo. Entre las colonias Libertad y 70-76 (Zona del Aeropuerto) y las colonias localizadas hacia el sur se define una serie bloques caídos que permiten inferir un sistema sujeto a esfuerzos tensionales (¿transensivo?). En los perfiles de la Figura 14 se observa la distribución, escalonamiento y dimensiones de estos bloques.

El Cañón Libertad tiene una longitud aproximada de 4 km (Figura 11). En su parte media, su orientación es predominantemente E-W, y en su parte inicial y terminal la tendencia es N-NE. El área de estudio cubre prácticamente toda la longitud y anchura del arroyo. Se observó que aquellas zonas

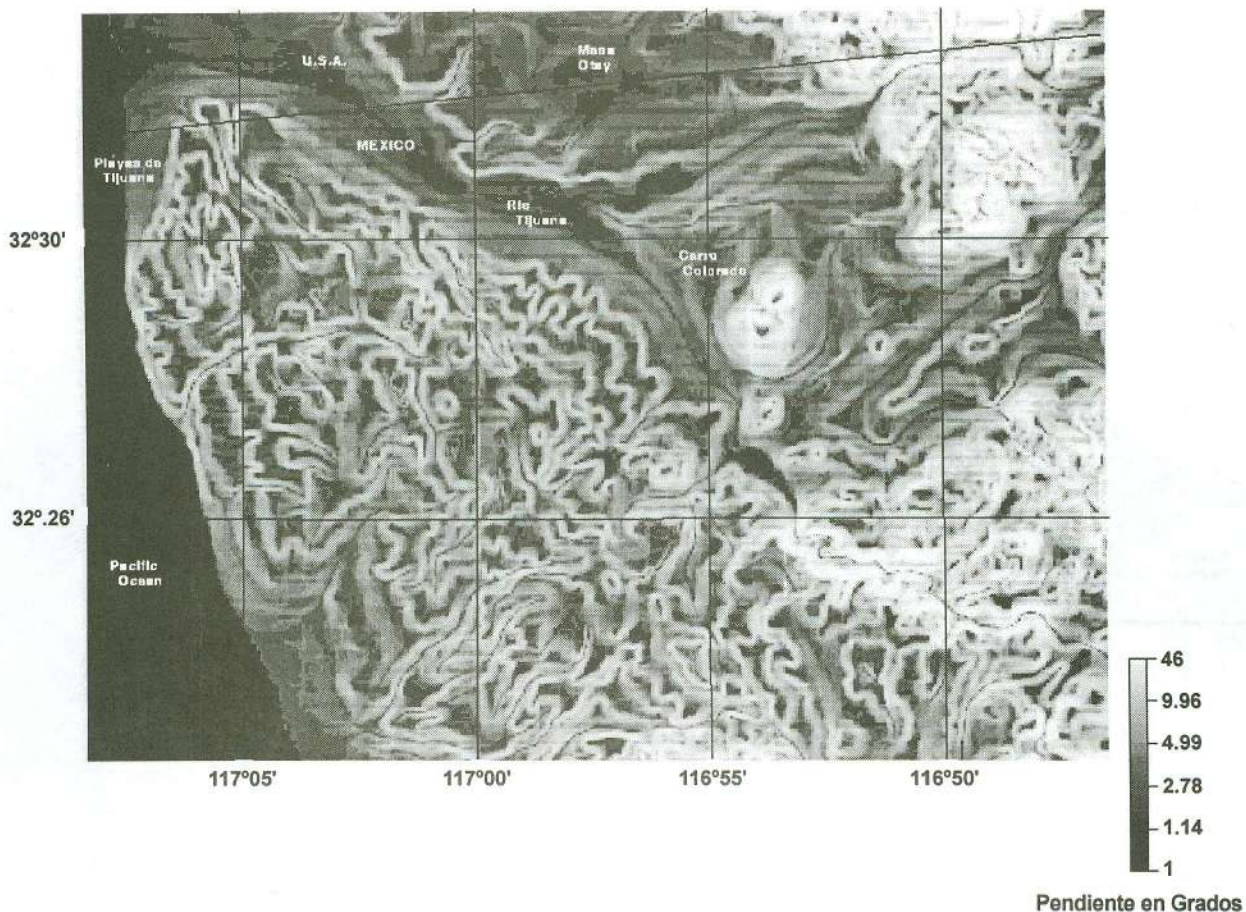


Figura 7. Mapa de pendientes calculado matricialmente a partir del Modelo Digital de Elevación del INEGI.

con pendiente más pronunciada o más cercana al cauce corresponden con los sitios afectados, en donde fue favorable efectuar cartografía geológica. Una de las estructuras más grandes que intersecta al Arroyo Libertad es el denominado Arroyo La Mona, el cual corresponde a una estructura de falla caracterizada por su intenso fracturamiento escalonado en dirección de la pendiente.

Las áreas donde se ha observado mayor inestabilidad del terreno son paralelas a la carretera al Aeropuerto Internacional, debajo de la Colonia 70-76 (incluye la Zona Los Paracaidistas). Las pendientes más fuertes en el Cañón Libertad alcanzan hasta los 37° y se reconocen sitios con pendientes promedio de 13°, en las que se ha observado inestabilidad. Este último detalle confirma la importancia del factor estructural en la estabilidad del terreno.

La estratigrafía de la zona está dominada por las formaciones San Diego en la base y Lindavista en la cima. Una de las características principales de ambas formaciones es su bajo grado de compactación. Otras particularidades de éstas se describieron en la sección de estratigrafía de este reporte.

El análisis estructural de El Patejé se hizo a dos niveles. Para el primero se interpretaron fotografías aéreas escala 1:15,000 y para el segundo, se hizo la medición *in situ* de estructuras de falla y fracturas.

Los lineamientos más prominentes muestran una tendencia hacia el NW, paralela a la de la cuenca del Arroyo Libertad. En la Figura 12a se presenta la rosa de lineamientos interpretados en fotografías aéreas tomadas en enero de 1993. Con la finalidad de ponderar la longitud de las estructuras, la rosa fue elaborada a partir de una cuadrícula de 50 X 50m, donde se contabilizó el número de cuadros que corta cada estructura. Se obtuvieron 1380 datos, de los cuales, el 31% se orienta hacia $N60^{\circ}W \pm 10^{\circ}$. Esta tendencia es importante pues incluso se observa en la planicie donde se encuentran las pistas aéreas. Los lineamientos orientados hacia el $N80^{\circ}W$ (7%) se desarrollan principalmente en el bloque central de la cuenca. La segunda tendencia importante de lineamientos es paralela al Arroyo La Mona, tiene una dirección $N25^{\circ}E \pm 10^{\circ}$ que corresponde al 15% de los datos y es ortogonal al primer grupo. Se interpreta que estas estructuras son las principales responsables de la inestabilidad observada en el Arroyo La Mona. En el extremo aguas arriba del Arroyo Libertad, en la planicie localizada hacia el oriente, se observa un largo lineamiento que coincide con una casa en construcción severamente afectada por fracturamiento, lo que podría indicar que esta estructura es activa. Además, el deslizamiento rotacional de más de 200 m de anchura en la cabecera, localizado hacia el poniente de la Colonia 70-76, está flanqueado por lineamientos en la misma dirección (Figura 11).

Se midieron 101 estructuras de falla y fractura *in situ*, principalmente en las laderas de los cerros, cauces de arroyos y

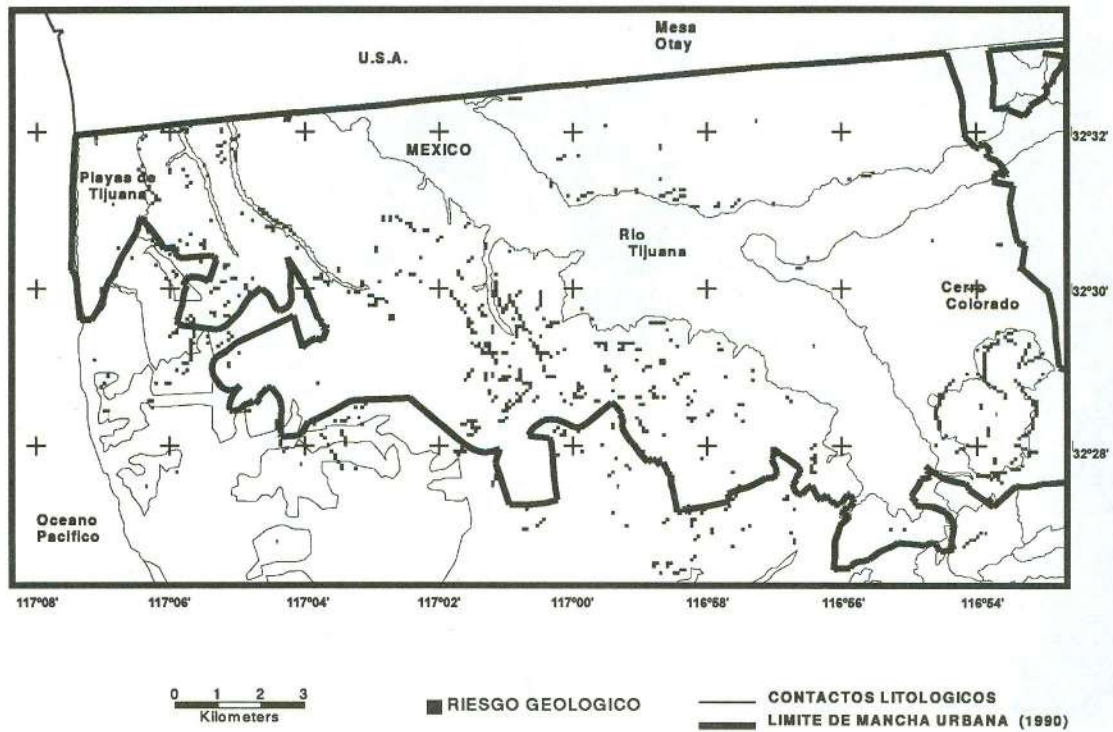


Figura 8. Estimación regional de riesgo para la Ciudad de Tijuana utilizando un umbral de pendiente del 18% (10°) e incluyendo todas las clases litológicas.

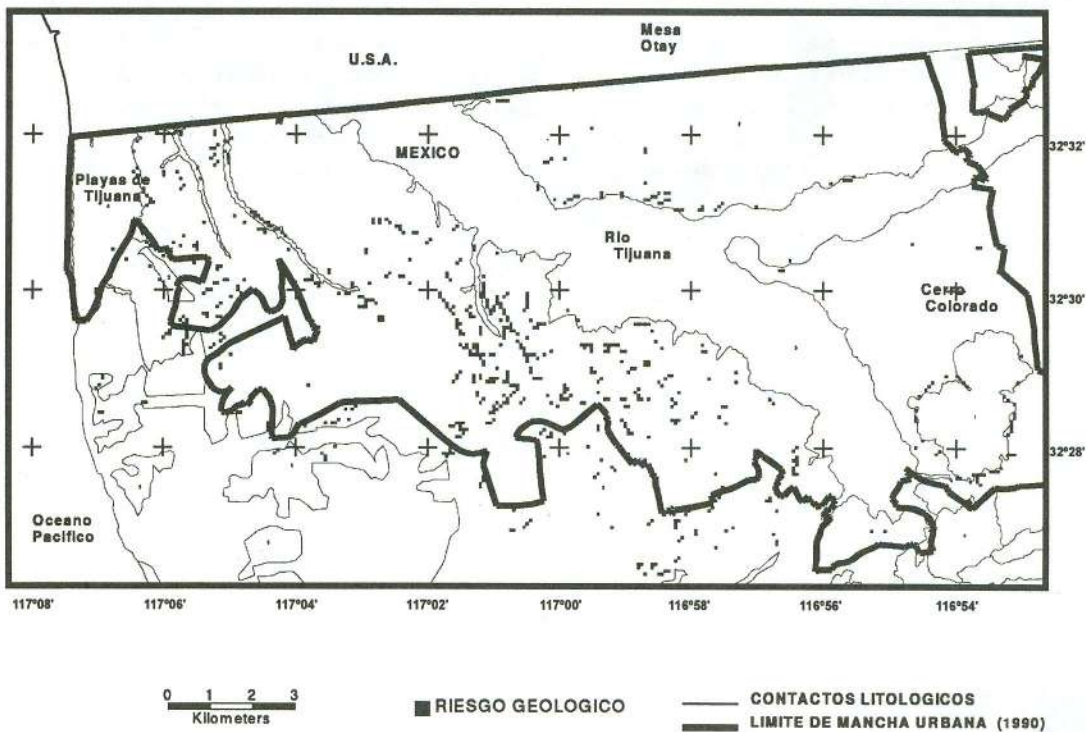


Figura 9. Estimación regional de riesgo en litología incompetente para la Ciudad de Tijuana utilizando un umbral de pendiente del 18% (10°). Nótese que el número de áreas vulnerables se reduce en aquellas zonas donde se tienen rocas competentes.

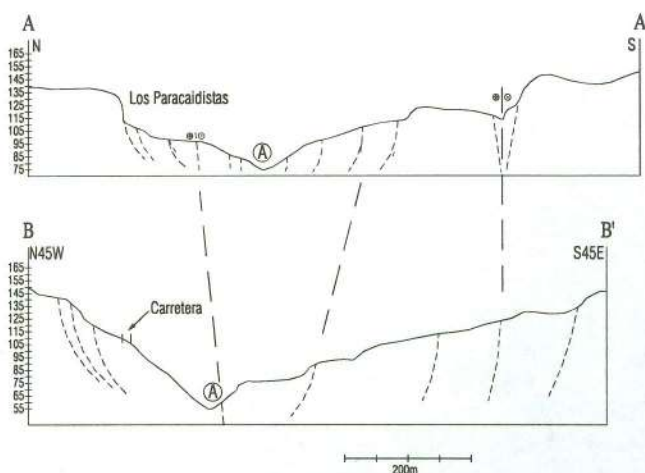


Figura 10. Perfiles topográficos con interpretación estructural A-A' y B-B' donde se muestra el desarrollo de bloques estructurales en el Área El Patejé (ver Figura 11).

cortes hechos para construcción. Entre estos datos se cuentan los levantados durante el trabajo anterior (Delgado-Argote *et al.*, 1993). El resultado del análisis de estas mediciones se muestra en la Figura 12b, donde se indican los contornos de concentraciones de polos en 2, 5 y 7%. La máxima concentración de polos es del 11% en S53°E/29°. Esta concentración y las localizadas en la porción NW, tienen correspondencia con el conjunto de fallas y fracturas orientadas hacia N60°E, identificadas también de los lineamientos. Asimismo, es notable también la coincidencia entre las estructuras orientadas hacia N25°W de los datos de campo con los interpretados de las fotografías aéreas. La coincidencia en la orientación entre ambos grupos de datos válida la interpretación de los lineamientos regionales, los cuales son utilizados en la estimación de riesgo para el área en su conjunto, según se verá enseguida.

ESTIMACIÓN DEL RIESGO CON BASE EN LA PENDIENTE Y LAS ESTRUCTURAS

La zona fue dividida en una cuadrícula de 50 X 50 m en los que se midió la pendiente y la suma de la longitud de estructuras que pasan por cada cuadro. Con base en experiencias anteriores (Delgado-Argote *et al.*, 1993), la división en áreas de 2,500 m² se consideró la más adecuada para la interpretación a escala 1:15,000. La pendiente (m) está indicada en por ciento en el margen superior izquierdo y la longitud de las estructuras (l) en metros, en el margen superior derecho. Al producto de esos dos valores se le llama Valor Empírico de Riesgo (R) y se presenta en el margen inferior izquierdo (Figura 13).

Con los valores de R se calculó un mapa de contornos de igual valor en siete intervalos: 0, 0-1, 1-10, 10-30, 30-50, 50-70 y 70-90. De los anteriores, los intervalos con valores entre 30 y 90 son los más significativos por contener a las zonas severamente afectadas por deslizamientos rotacionales. En el Figura 14, éstas se observan en el Arroyo La Mona, el Cañón Libertad entre el arroyo anterior y la longitud 500,100E (aproximadamente el inicio de la Calle Carlota Sosa), así como

la ladera de la mesa de la Colonia 70-76. Fuera de estas zonas, el Cañón Emiliano Zapata, cerca de la línea internacional, aparece también con valores altos de riesgo, sin embargo no se visitó. El Cañón Libertad, a partir de su intersección con la Calle Pasteur, es conocido por su alta vulnerabilidad, y en este análisis aparece con altos valores de riesgo hacia los alrededores, pendiente abajo de la Calle Angela Peralta, donde varias construcciones se observan seriamente fracturadas y localmente se identifican movimientos de ladera del terreno que han obligado a abandonar algunas casas.

En las laderas de la mesa de la Colonia 70-76, se identifican cinco pequeños sitios con altos valores de riesgo, entre los que está incluida la zona Los Paracaidistas, también identificada como vulnerable desde hace tiempo. Se visitaron otros sitios donde se ha observado fracturamiento en casas habitación, sin embargo, aún no muestran desplazamientos considerables. En particular, los dos sitios localizados en la proyección hacia el oriente de la Calle Alberto Balderas son interesantes, pues corresponden a zonas de pendiente moderada a baja y las casas muestran daño. En contraste, las casas localizadas en el borde de la Colonia 70-76 presentan una gran inestabilidad asociada principalmente a la fuerte pendiente. En la calle que delimita a esta colonia del talud se alcanza a observar la separación incipiente de las casas con respecto a las banquetas.

Es importante que las zonas localizadas dentro del intervalo de 11-30 sean monitoreados a través de la evolución del fracturamiento de las obras civiles pues es probable que los sitios donde la densidad de estructuras es más alto, existan estructuras activas. Un ejemplo de lo anterior corresponde a la última zona marcada en el intervalo 10-30, localizada en el extremo oriental del Figura 14, en la cual, sin observarse una fuerte pendiente, se identificó una casa en construcción con fracturamiento en paredes y cimentación.

ÁREA EL PATO

Tanto la magnitud como el número de sitios afectados en el Área El Pato son menores que en El Patejé. Estos sitios se concentran en la primera mitad del Cañón El Pato, aguas arriba a partir del Libramiento, y en la margen derecha o sur del cañón. El cañón corre en dirección aproximada E-W y se caracteriza por sus pronunciadas pendientes que en algunos sitios rebasan el 40%. Los perfiles topográficos de la Figura 15 indican una morfología en "V" sin aparente control estructural pese a su tendencia rectilínea. Algunos bloques estructurales son claros en las colonias localizadas al N y NW de cañón (Figura 16). La longitud de esta porción del cañón es de cerca de 2 km, hasta curverse, aguas arriba, para seguir un rumbo N-S. En las laderas norte y sur del cañón, algunos arroyos rectilíneos orientados principalmente N-NW tienen claro origen estructural.

La estratigrafía de la zona está dominada por areniscas con bivalvos y areniscas conglomeráticas de la Fm. San Diego. Localmente se observaron horizontes de cenizas retrabajadas derivadas probablemente de la subyacente Fm. Rosarito Beach. Las areniscas y conglomerados están pobremente cementados,

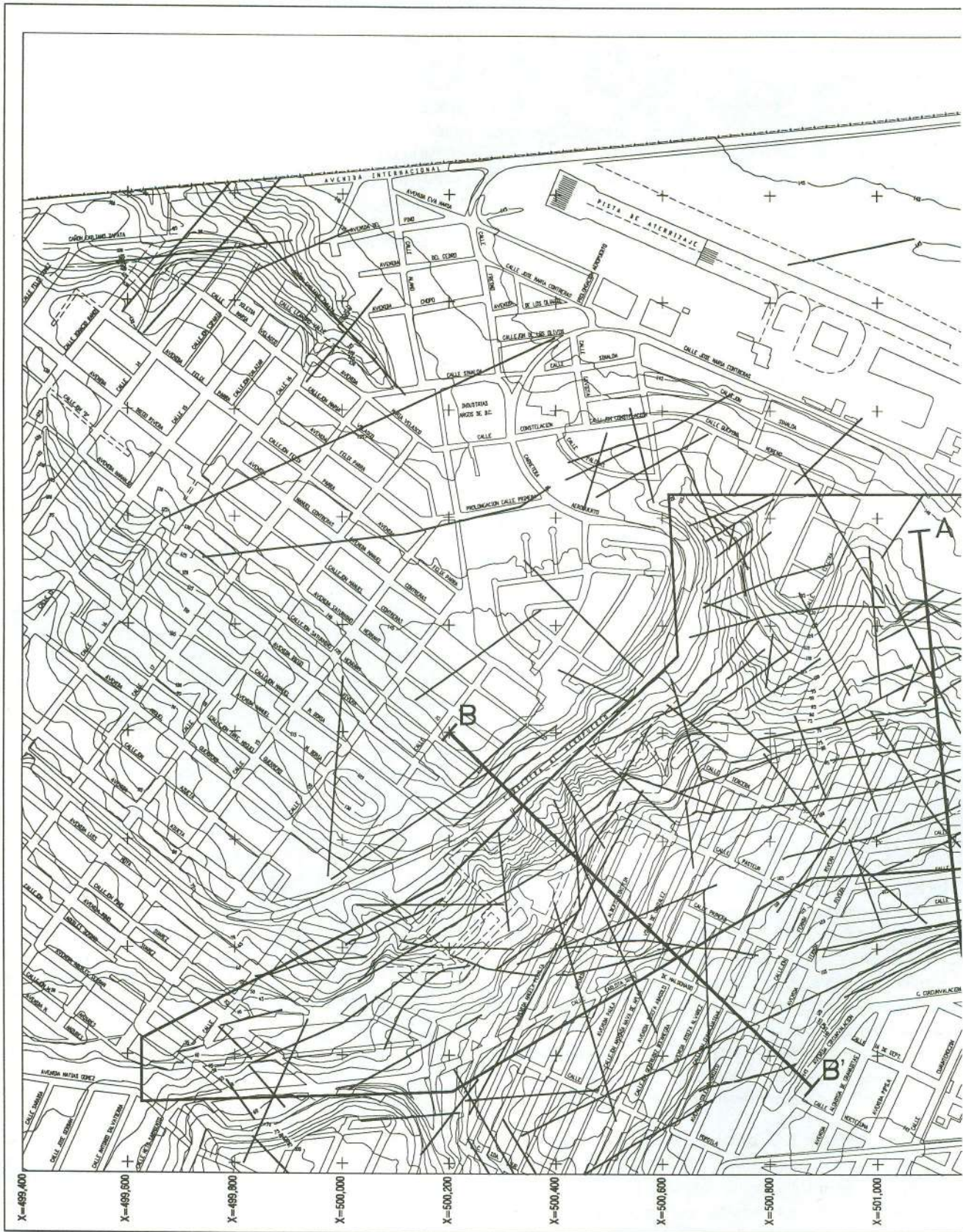


Figura 11. Interpretación fotoeológica de lineamientos estructurales en el Área El Pastejé. Se utilizaron fotografías aéreas de Carlos Ceseña (enero 1993) escala 1:15,000. Las áreas indicadas muestran las zonas donde se efectuó reconocimiento de campo.

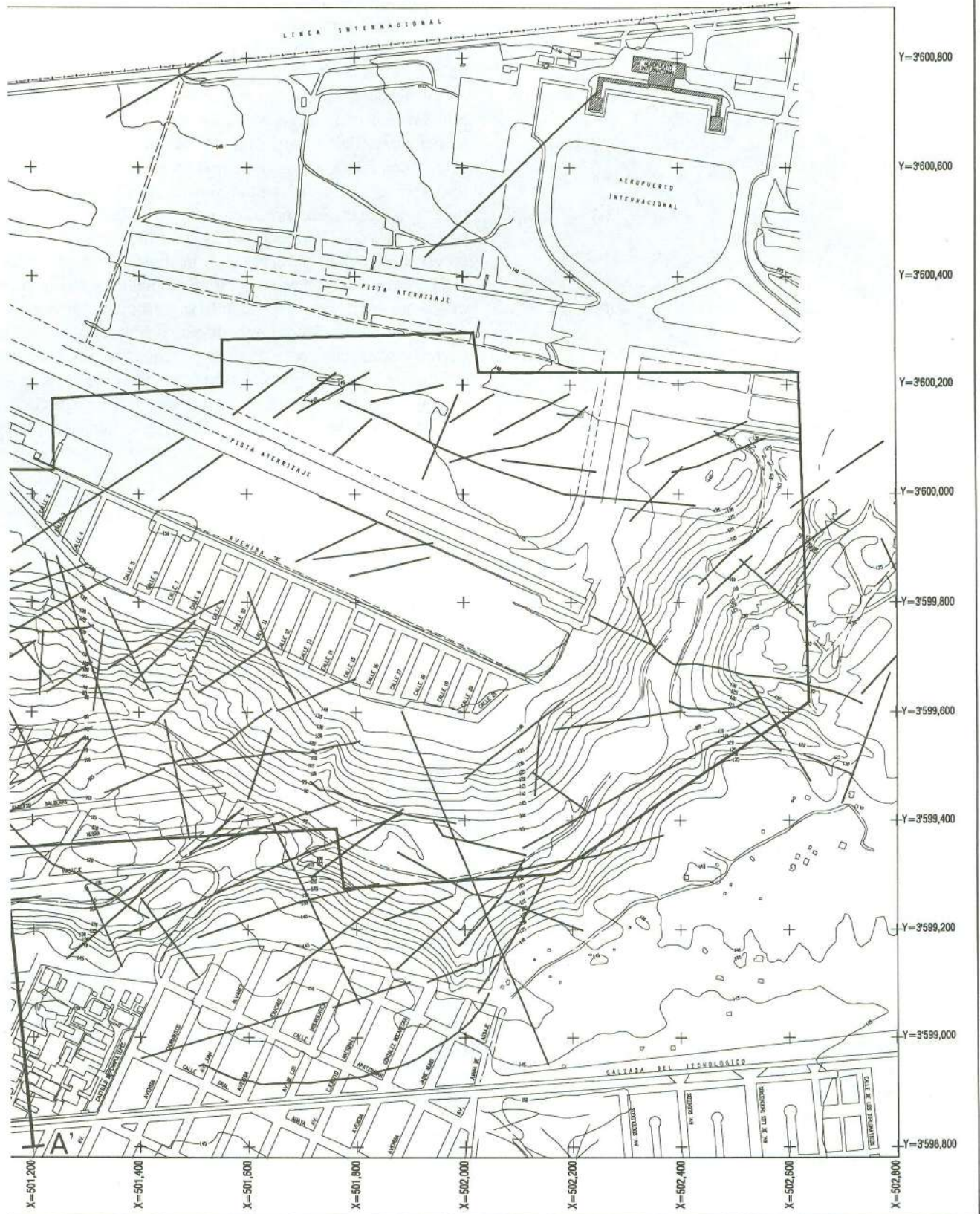


Figura 11. Continuación

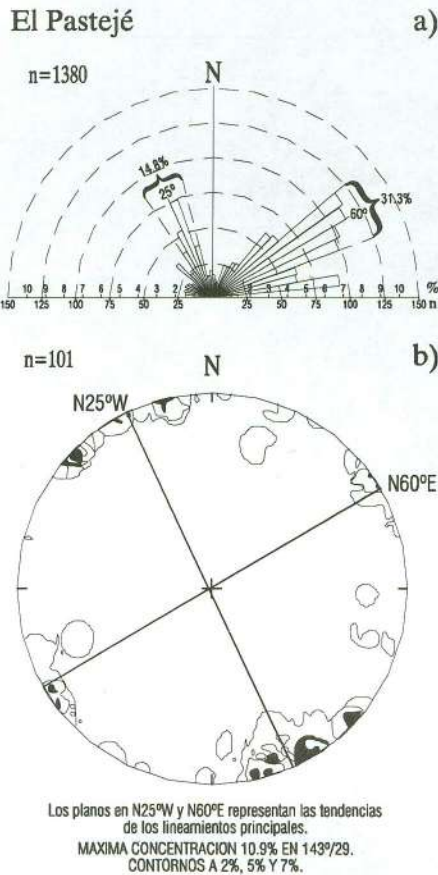


Figura 12 a). Roseta de lineamientos estructurales interpretados de fotografías aéreas en el Área El Patejé. b). Estereograma de fallas y fracturas cartografiadas a detalle en el Area El Patejé.

y al igual que los conglomerados de la Fm. Lindavista (?), que les sobreyacen, se disgregan fácilmente con la presencia de agua. En general, la estratificación muestra una inclinación hacia el norte, de manera que las capas buzan hasta en 15° en dirección opuesta a la pendiente en la parte norte del cañón, y a favor de la pendiente en la ladera sur de éste. Esta geometría explica en parte (independientemente del fracturamiento) el que la inestabilidad del terreno sea mayor en la parte sur del cañón.

Al igual que en el área anterior, en El Pato se efectuó una interpretación de fotografías aéreas a una escala aproximada de 1:30,000 (vuelos del INEGI de 1973) y se hizo la cartografía de campo de estructuras en mapas topográficos 1:2,000.

La interpretación de los lineamientos estructurales muestra una geometría compleja con tendencias dominantes hacia N45°W y N60°E. Según se muestra en la Figura 16, donde se localizaron los lineamientos interpretados en la base topográfica de casi 8 km², estas tendencias convergen notablemente en la zona estudiada. De la rosa de estructuras en la Figura 18 se observa que el 30% de los lineamientos (598 datos medidos en una cuadrícula de 100 X 100m) se encuentran entre N65°W y N20°W con tres máximos de concentración en N60°W, N45°W y N30°W, cada uno de ellos con menos del 5% de los datos. Hacia el NE, las máximas concentraciones se observan entre N55°E y N70°E (22% de los lineamientos), con un máximo en

N60°E que representa más del 8% del total de los datos.

Los dos grupos descritos son significativos pues correlacionan con bastante confianza con las fallas y fracturas medidas en el área. En la Figura 17b se presentan los contornos de concentración de polos (2, 5 y 7%) de 127 fallas y fracturas. Se puede observar que las máximas concentraciones hacia el NE-SW, corresponden a planos de fallas y fracturas con tendencia paralela a la orientación del conjunto de lineamientos orientados hacia aproximadamente N45°W; las fallas más importantes por su magnitud son de desplazamiento lateral derecho; siguen esta dirección y cortan a la Fm. San Diego, pero no a los conglomerados de la Fm. Lindavista (?). Con base en estas relaciones de corte, y al hecho de encontrar además fallas sindeposicionales en la Fm. San Diego, se puede afirmar que estas estructuras fueron activas hasta hace menos de un millón de años. El conjunto de polos alrededor de N30°W correlacionan con los máximos de lineamientos cercanos a N60°E. En esta dirección se observó principalmente fallamiento lateral izquierdo y normal, donde este último afecta a los depósitos de la Fm. Lindavista (?). Al igual que en El Patejé, esta correlación valida la interpretación de lineamientos que adelante serán utilizados para el análisis de riesgo.

ESTIMACIÓN DEL RIESGO CON BASE EN LAS PENDIENTES Y ESTRUCTURAS

La zona fue dividida en una cuadrícula de 100 X 100 m, que son las que mejor resuelven la interpretación de lineamientos a escala 1:15,000 (Figura 16).

Los contornos de igual valor de R se muestran en las Figuras. 18 y 19, en donde se separan cinco regiones cuyos intervalos de valores son: 1-10, 10-30, 30-50, 50-70 y 70-90. Las zonas afectadas por deslizamientos coinciden con los dos últimos intervalos y según se observa, características similares se repiten tanto hacia el NW como hacia el SE de estos sitios, siguiendo la tendencia estructural. Es importante notar, sin embargo, que la región más amplia en la parte central del mapa se localiza en una zona sin urbanización. Es notable también, que las zonas de más alto riesgo se localizan en la parte sur del Cañón El Pato donde además, la estratificación buza hacia el norte, en dirección de la pendiente, haciendo a esta región más vulnerable por favorecer los deslizamientos. En la parte norte del cañón se observa una zona de alto riesgo elongada en dirección N-S, paralela a la Avenida de Las Rosas en una zona más densamente urbanizada. Es importante monitorear en el futuro, tanto estas zonas, como aquellas donde los valores de riesgo se encuentran en el intervalo de 30-50, pues implican la presencia de estructuras importantes.

EFFECTO DE SITIO

El área del Cañón El Pato fue seleccionada para cartografía geológica de detalle atendiendo a los reportes de deslizamientos de ladera a partir de las lluvias de enero de 1993. A continuación se describe uno de ellos para ilustrar el efecto de sitio de los factores descritos en el marco teórico y en el inciso anterior.

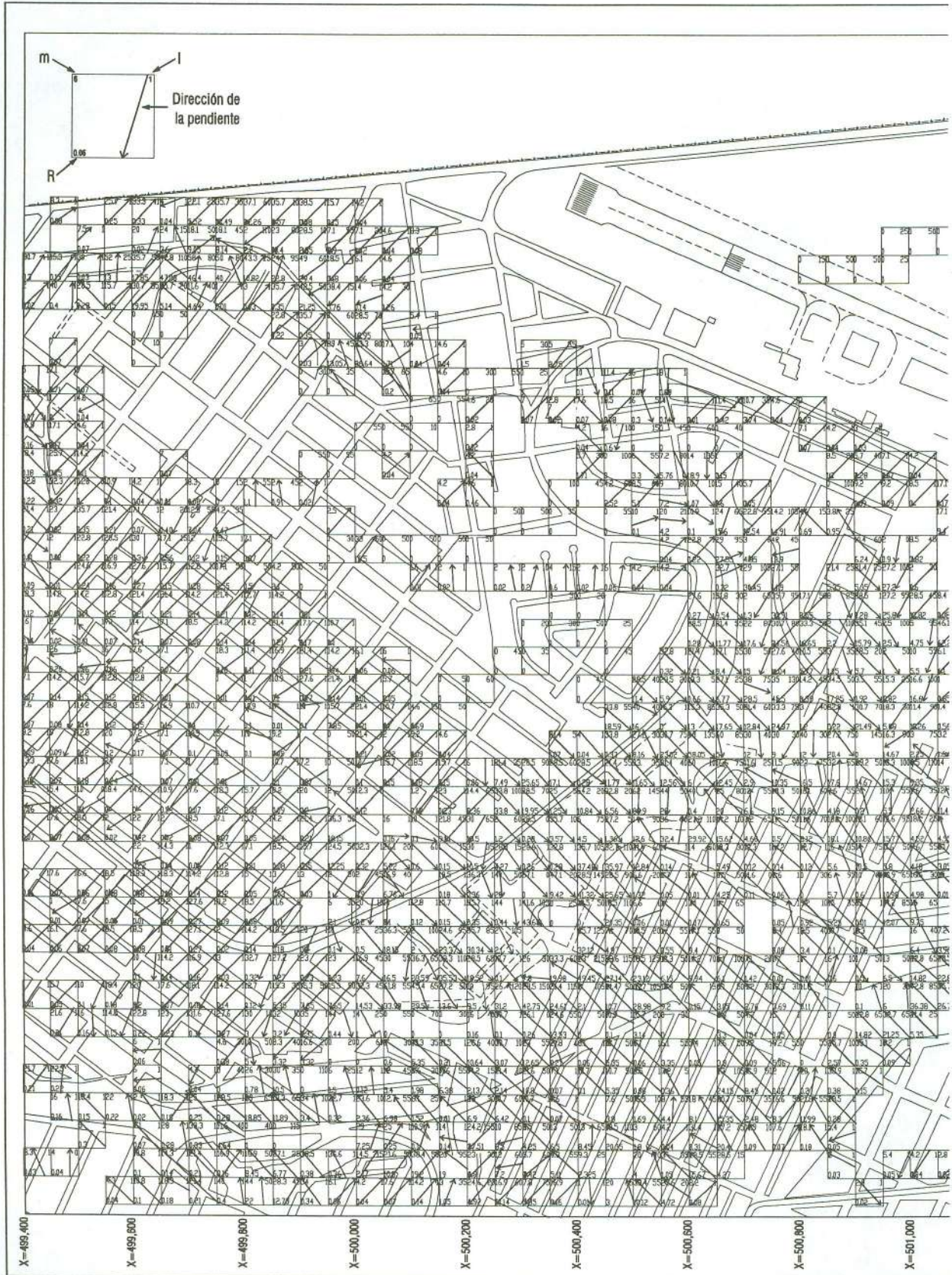


Figura 13. Áreas de medición de pendiente (m), suma de la longitud de estructuras de fallas y fracturas (I) y valor empírico de riesgo (R) en el Área El Pastejé. Los cuadros equivalen a 50x50 metros.

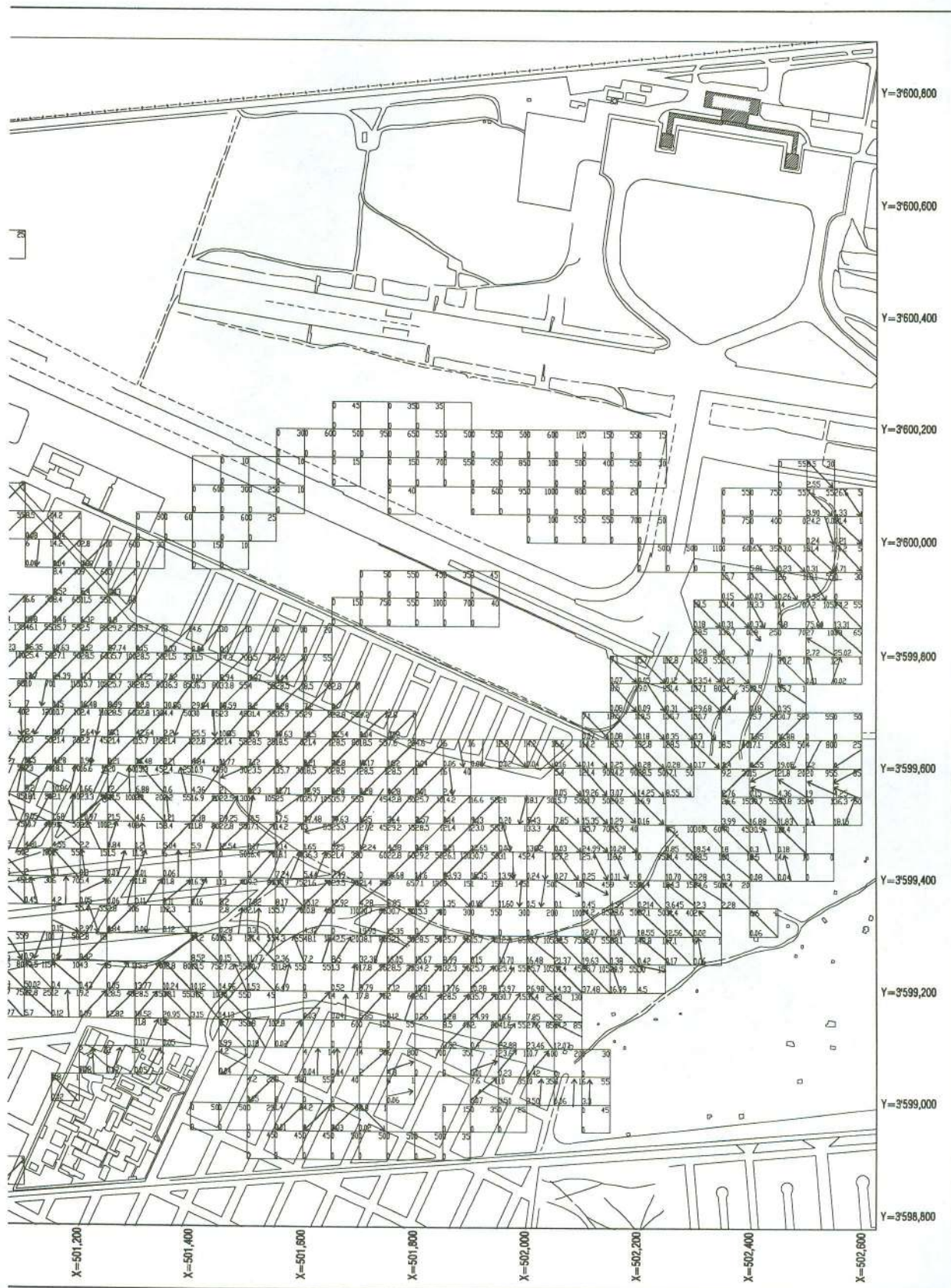


Figura 13. Continuación

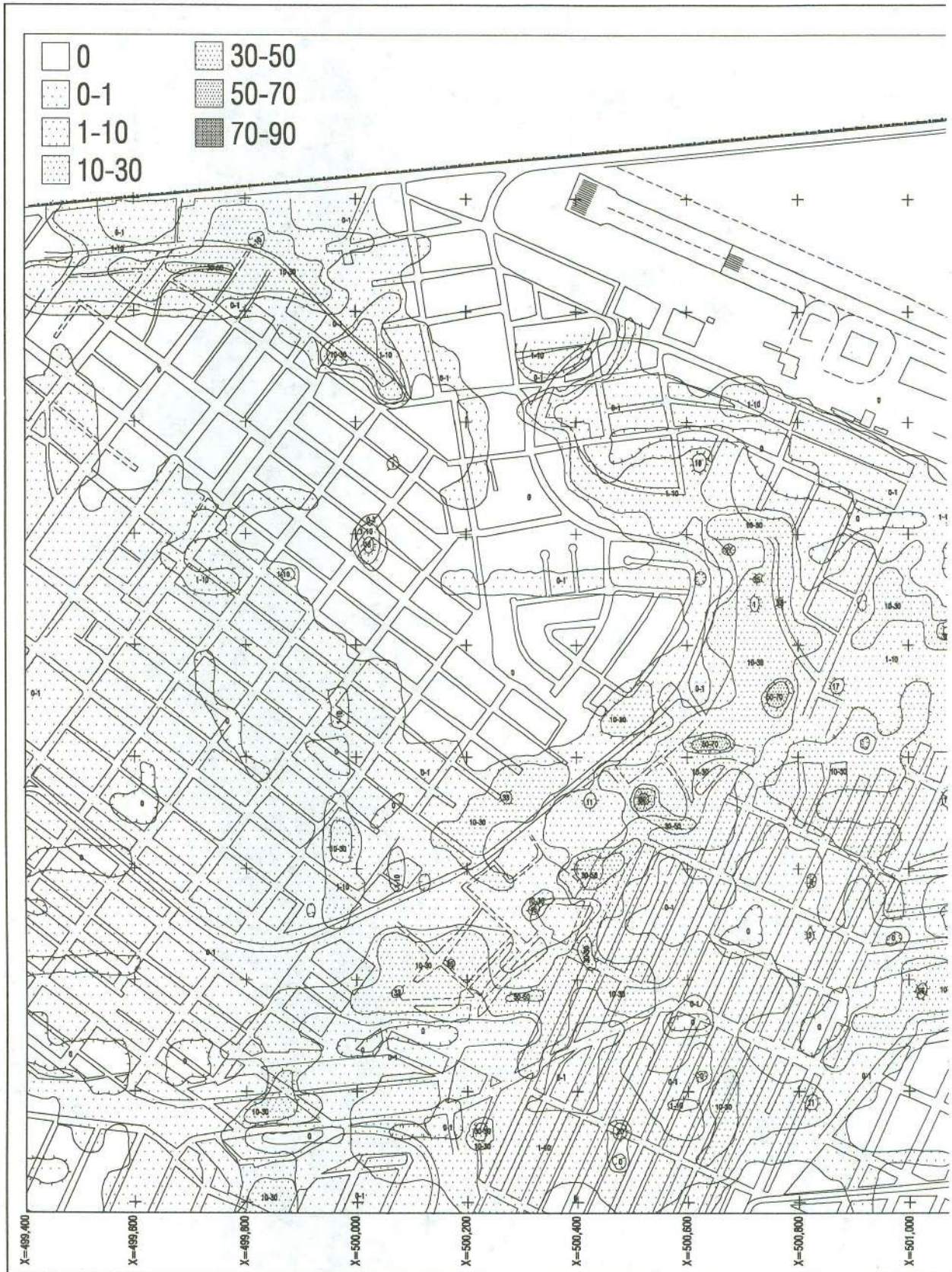


Figura 14. Contornos de intervalos de Valores de Riesgo en el Área El Pastejé, tomados de la Figura 13. Ver texto.

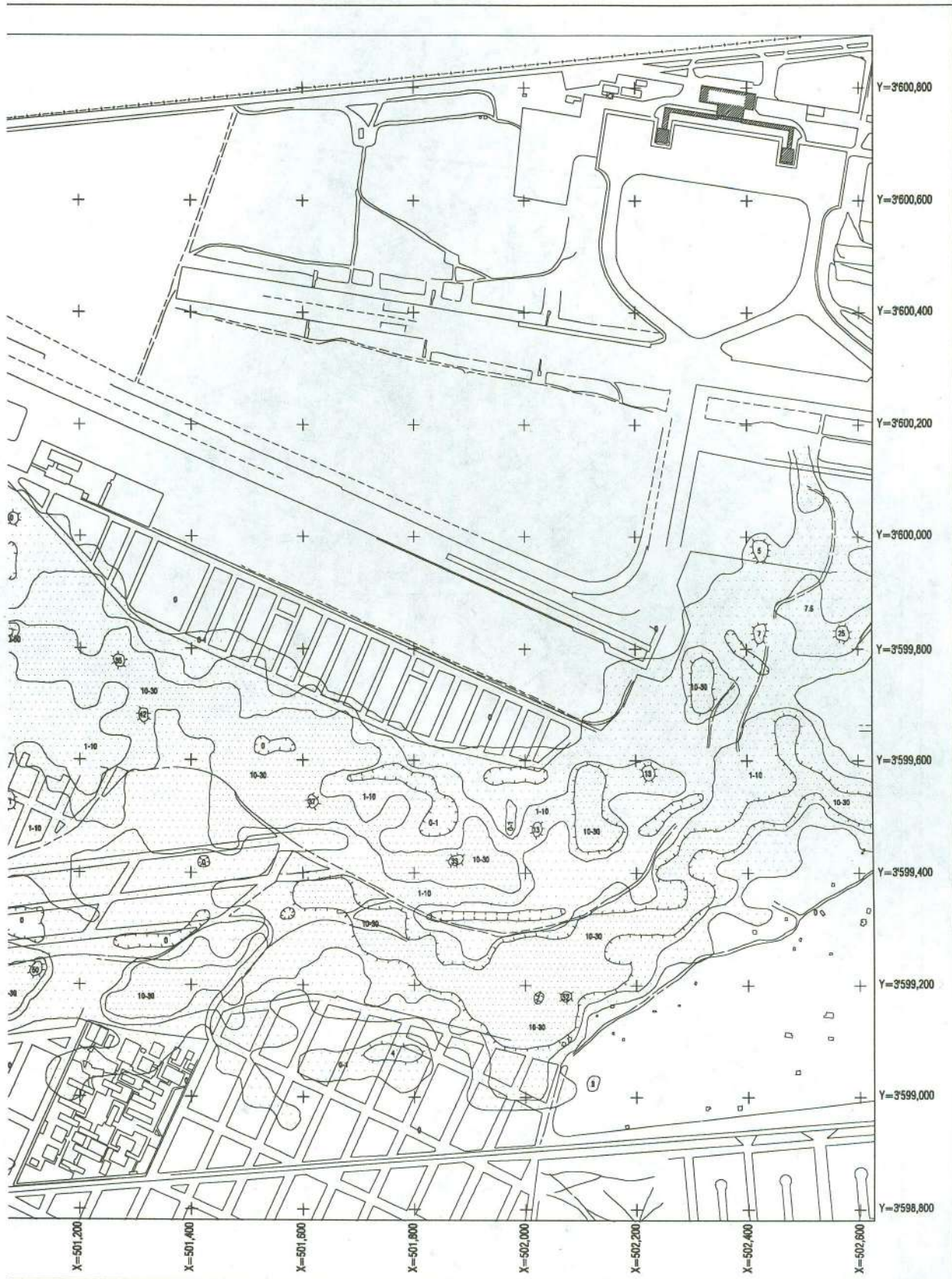


Figura 14. Continuación

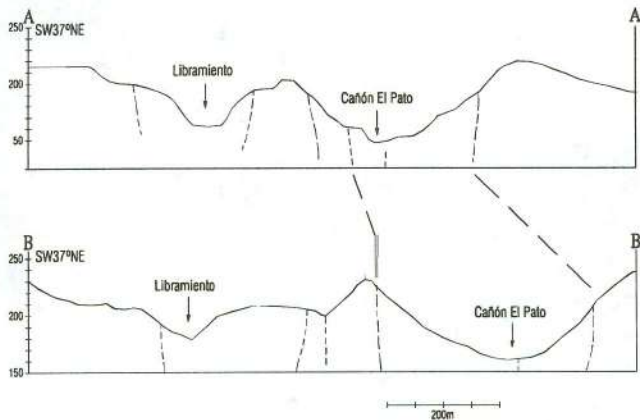


Figura 15. Perfiles topográficos con interpretación estructural A-A' y B-B' donde se muestra el desarrollo de bloques estructurales en el Área El Pato (ver Figura 16).

El movimiento de ladera de El Pato es un deslizamiento rotacional ubicado en la Colonia Chihuahua (Figura 16), en el flanco sur del Cañón El Pato, cuyo movimiento acelerado se inició en las primeras horas del 9 de febrero de 1993.

Según afirman los vecinos de la zona afectada, el deslizamiento se inició con ruido proveniente del subsuelo. En las primeras 6 horas de fallamiento se acumuló un total de medio metro de desplazamiento en lo que después se definió como el escarpe principal. Unas 48 horas después, el salto máximo acumulado fue de 1.5 metros y dos semanas más tarde, el salto

máximo total ascendió a 3.5 metros. La Figura 20 ilustra el deslizamiento después de dos semanas de iniciado el movimiento.

Durante el primer día de movimiento se formaron una serie de bloques caídos y levantados cercanos a la cabecera de la falla principal (A en la Figura 20), el salto máximo después de dos semanas de movimiento fue de 1 metro. En el frente de deslizamiento (B en la Figura 20) se presentó un efecto de levantamiento y deslizamiento horizontal de estructuras rígidas, además de la fluencia lenta de material en el talud cortado para edificar casas.

Al elaborar la interpretación de fotografías aéreas escala 1:30,000 (INEGI, 1973), se detectaron dos lineamientos, uno con rumbo N60°W y otro casi N10°W, que se intersectan justo en el sitio en que se produjo el deslizamiento de El Pato. Durante la cartografía de detalle, se comprobó que ambos lineamientos existen en el terreno; el primero corresponde a una falla normal bien definida con rumbo N64°W buzando 72° al norte y el segundo es un sistema de fracturas penetrativas de rumbo N21°W buzando alrededor de 75° al este. La pendiente del terreno en algunos lugares antes de enero era superior al 35%. En la Figura 20, la falla normal detectada en campo está marcada con una C. El sistema de fracturas se indica con una D. Como se aprecia en la figura, entre las dos estructuras se forma un bloque inestable que tiende a deslizarse conforme la pendiente del terreno se incrementa.

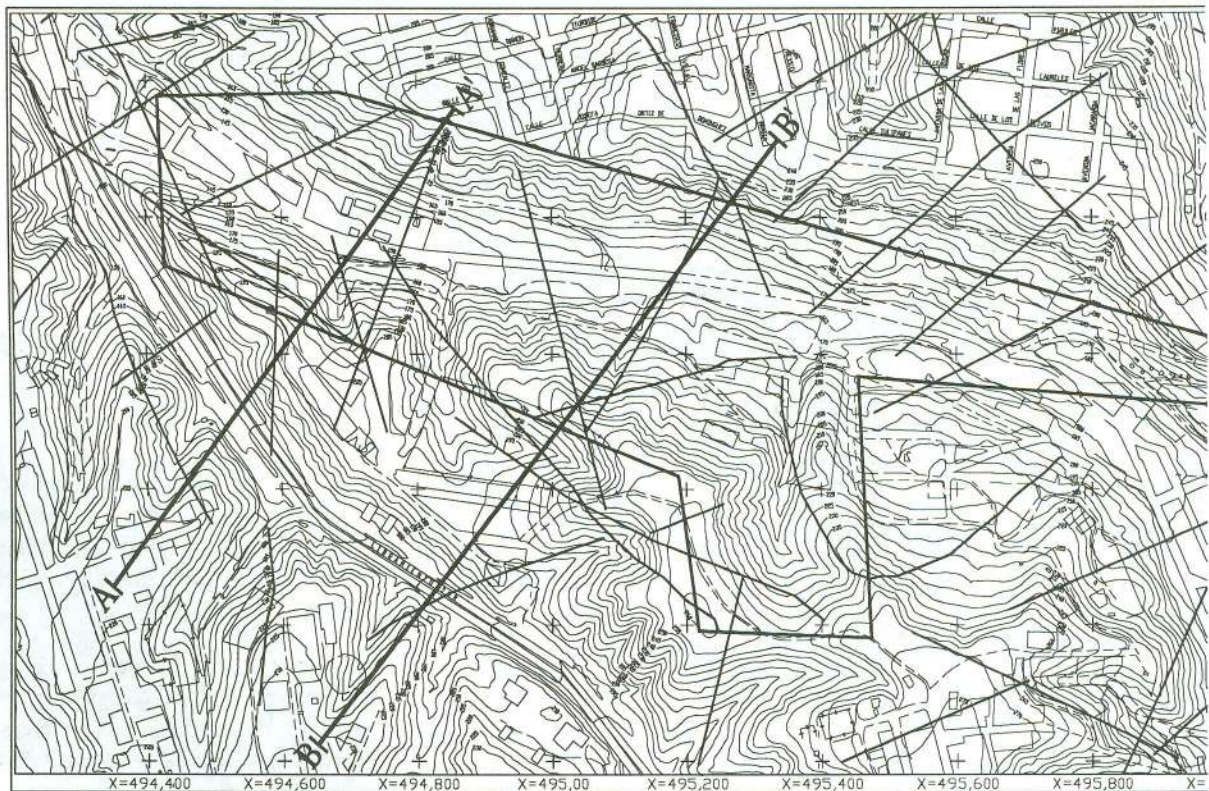


Figura 16. Interpretación fotogeológica de lineamientos estructurales en el Área El Pato. Se utilizaron fotografías aéreas del INEGI (1973) escala 1:30,000. Las áreas indicadas muestran las zonas donde se efectuó reconocimiento de campo.



Figura 16. Continuación

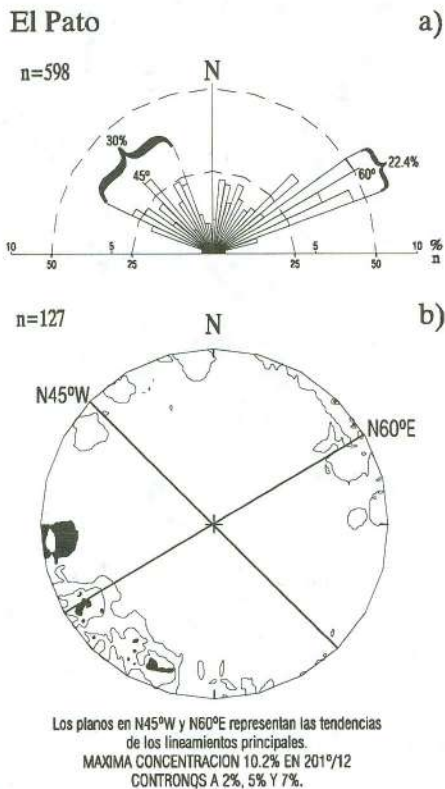


Figura 17. a) Roseta de lineamientos estructurales interpretados de fotografías aéreas en el Área El Pato. b) Estereograma de fallas y fracturas cartografiadas a detalle en el Area El Pato.

Al elaborar los contornos de intervalos de riesgo, el área que comprende el deslizamiento queda incluida en uno de los máximos ($R > 50$), debido a la presencia de varias estructuras y a la fuerte pendiente (Figura 19).

Cuando los habitantes de la zona efectuaron cortes en el talud original, aumentaron localmente los valores de pendiente, lo cual aumentó la inestabilidad de toda la ladera. El factor disparador del deslizamiento se asocia con la sobresaturación de agua que se registró durante los primeros meses de 1993, aunque es necesario recalcar la importancia de el fallamiento preexistente y la fuerte pendiente del terreno.

ÁREA CAÑADA VERDE - SÁNCHEZ TABOADA.

La tercer área estudiada a detalle para la evaluación del riesgo geológico se denomina Cañada Verde-Sánchez Taboada. Esta zona se estudió a petición de las autoridades municipales de Tijuana, quienes reportaron numerosos deslizamientos y pérdidas materiales durante enero de 1993.

Al realizar los trabajos de campo encontramos, al igual que en las áreas El Patejé y El Pato, que los daños materiales fueron causados principalmente por dos motivos: el primero se debió a que muchas construcciones se encuentran asentadas en los cauces naturales de los ríos y arroyos; el segundo está ligado a movimientos de ladera de los tipos fluencias de terreno y deslizamientos rotacionales, dominando los segundos.

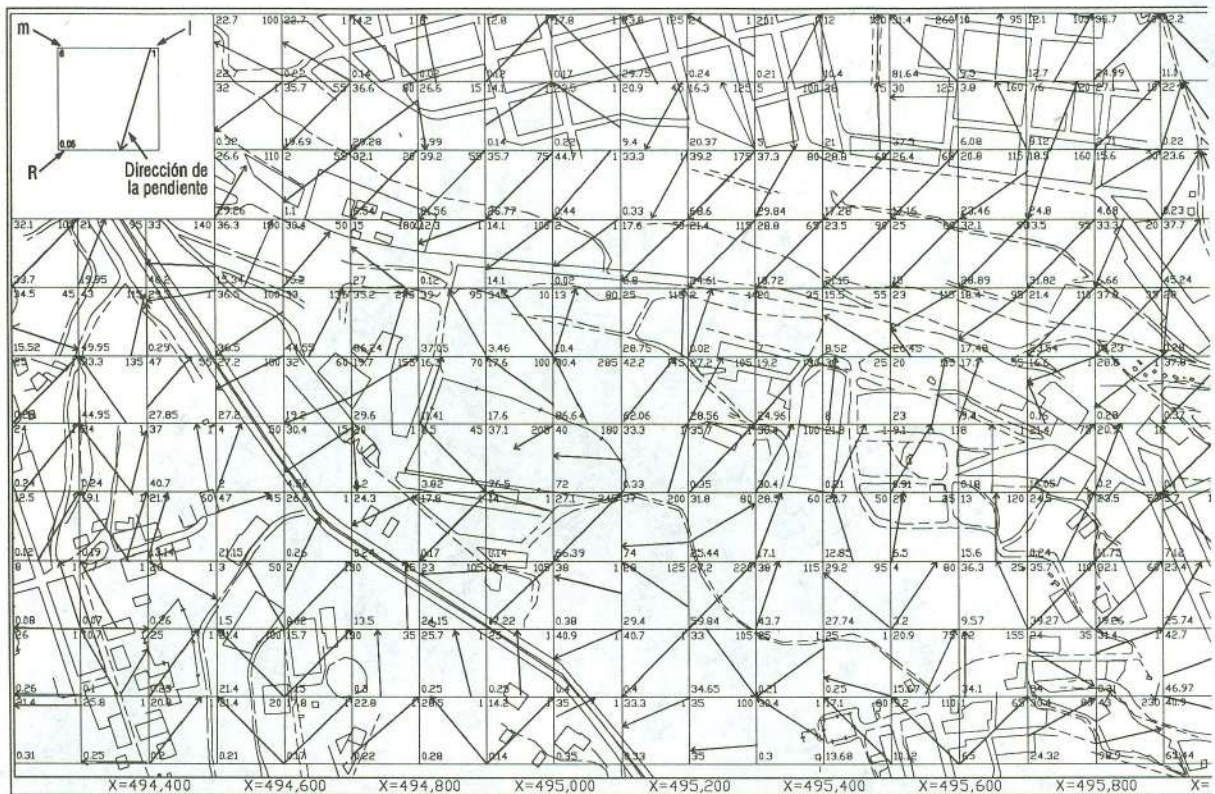


Figura 18. Áreas de medición de pendiente (m), suma de la longitud de estructuras de fallas y fracturas (l) y valor empírico de riesgo (R) en el Área El Pato. Los cuadros equivalen a 100x100 metros.

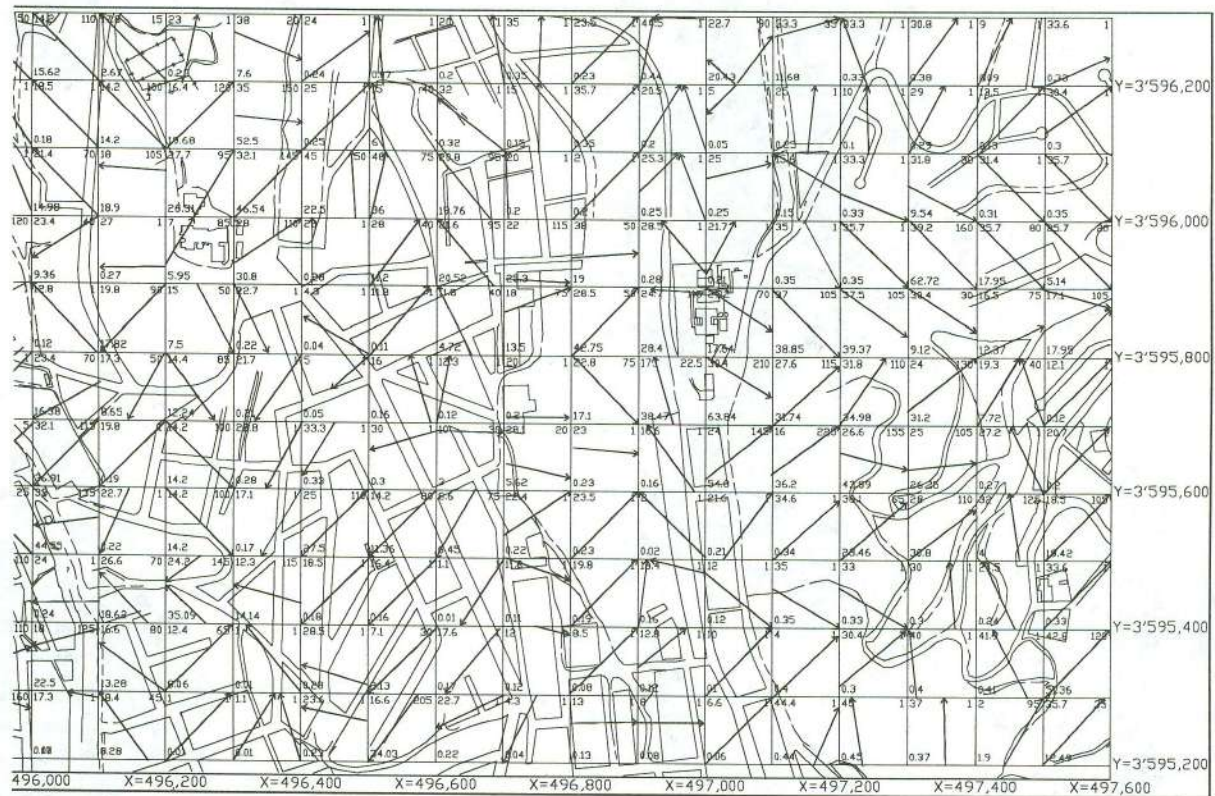


Figura 18. Continuación

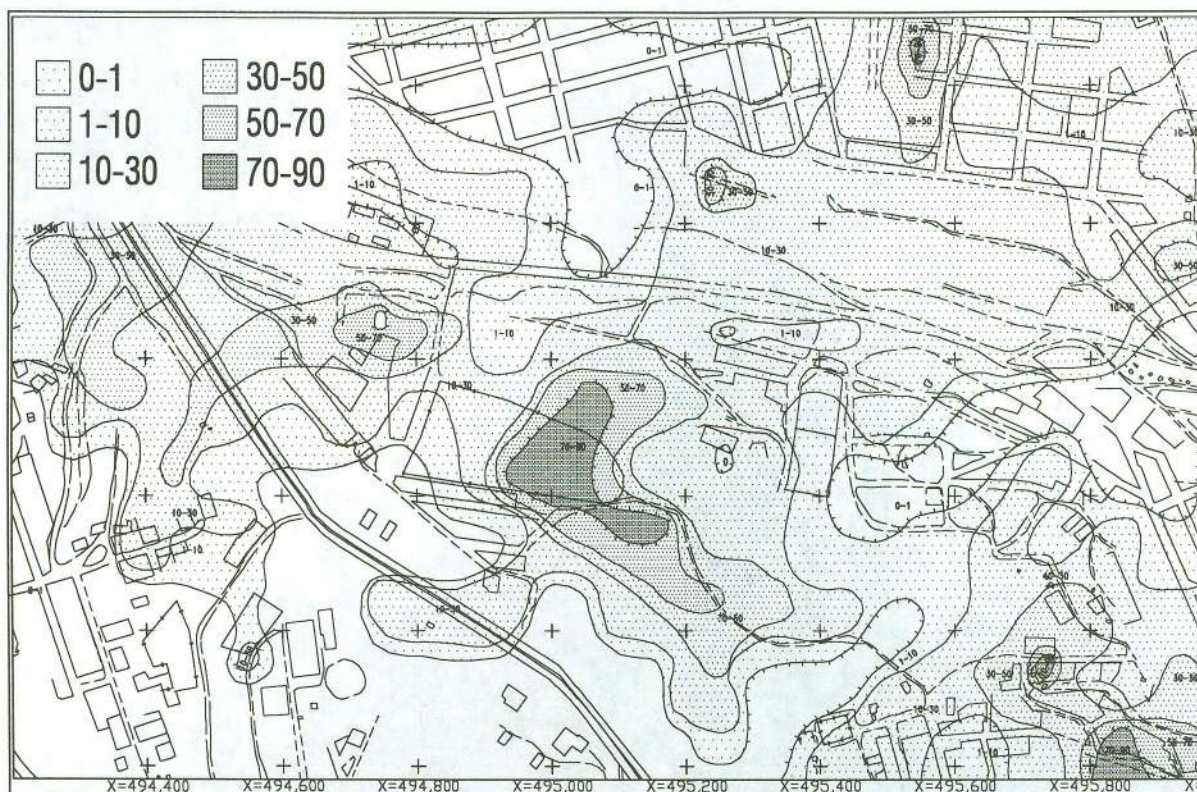


Figura 19. Contornos de intervalos de Valores de Riesgo en el Área El Pato, tomados de la Figura 18. Ver texto.

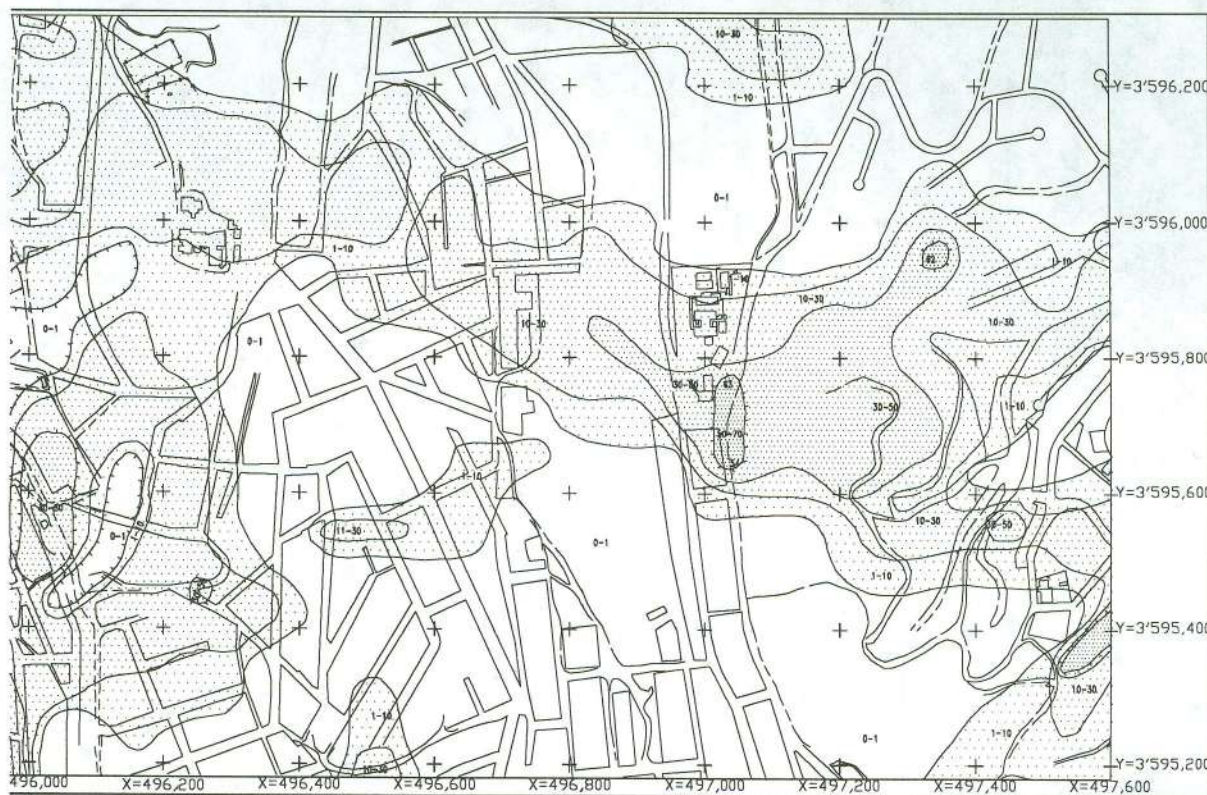


Figura 19. Continuación

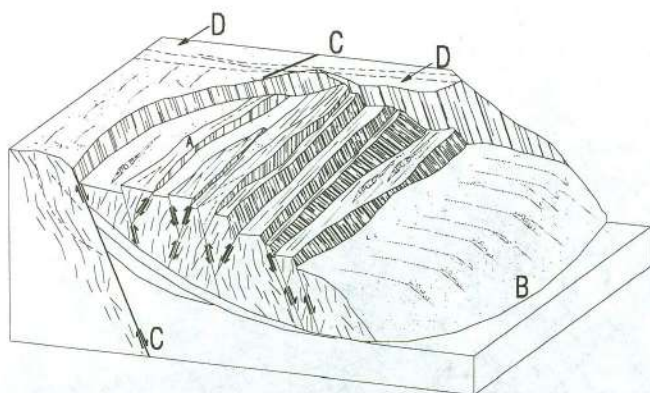


Figura 20. Diagrama bloque que ilustra el movimiento rotacional de El Pato, ocurrido en el Cañón del mismo nombre.

El área de Cañada Verde-Sánchez Taboada se ubica al sur del cruce conocido como la "5 y 10" y cubre un total de 10.3 km². En su lado occidente está cruzada por el Libramiento Oriente (Figura 21).

Los sedimentos que afloran en el área son arenas medias a gruesas y conglomerados con todo tamaño de clastos pertenecientes a la Fm. San Diego. Geomorfológicamente, se encuentra en el flanco sur del Río Tijuana, dentro de la zona de alta disección de drenaje. Localmente se observan arroyos rectos bien definidos y de fuerte pendiente en las laderas; las cabeceras son por lo general rectas, aunque en algunas ocasiones se encuentran cabeceras curvilíneas que serán descritas posteriormente. Las corrientes principales drenan en dirección N45°E y forman, entre cada una de ellas, pequeñas serranías alargadas en la misma dirección. El drenaje secundario tiene por lo general una orientación N30°W y S30°E, de manera que entre ambos forman una red de drenaje aproximadamente romboedral.

Para esta zona se interpretaron fotografías aéreas a color escala 1:30,000 del INEGI (1973). La fotointerpretación estructural se presenta en el Figura 22a. Los datos estructurales están representados en la roseta de fracturas de la Figura 22b. En ella se puede observar una tendencia N35°-75°E, con máximos a N45°-50°E, N55°-60°E y N70°-75°E. Y otra orientación principal entre N20°-30°W.

Las estructuras con mayor continuidad, mejor definición y asociadas a accidentes topográficos de mayor longitud se presentan con rumbo N55°-65°E. En general corresponden a fallas normales que definen un sistema de bloques caídos y levantados.

El trabajo geológico de campo consistió en la cartografía de fallas, fracturas y rasgos geomorfológicos importantes a escala 1:2,000. Los datos estructurales colectados en campo corroboran la validez de la fotointerpretación, según se muestra en la roseta de la Figura 23. Al comparar la Figura 22a con la Figura 22b, es notorio que los datos de campo presentan una mayor dispersión, lo cual se debe a que el material está poco consolidado. Se observa también un fracturamiento con rumbo

N10°-25°E, que no se identifica en las fotografías aéreas.

En la Figura 22c se presentan los rasgos de campo en un estereograma (intervalos a 2, 4, 6 y 8%). La máxima concentración de polos se presenta en N45°W/7° y corresponde al 10.3% de los datos. En el diagrama se definen claramente tres grupos de estructuras: el primero tiene su máxima orientación hacia N45°E buzando 83° al SE; el máximo del segundo grupo se encuentra ubicado en N23°E buzando 84° hacia el E; por último, el tercer grupo de estructuras se orienta preferentemente hacia N18°W buzando 83° al E.

Al analizar los grupos de orientaciones de los datos de campo (Figura 22c), se obtiene que en el primero de ellos (N45°E/83°SE) están contenidas las fallas principales, las cuales controlan la formación de bloques hundidos y levantados que controlan la morfología del terreno. El segundo grupo de estructuras (N23°E/84°E) contiene casi exclusivamente fracturas (solamente una falla); por lo general están subordinadas al primer grupo (N45°E/83°SE). Las topoformas originadas en la conjunción de estructuras de estas dos orientaciones semejan las facetas triangulares descritas comúnmente en sistemas transcurrentes. Estas fracturas no se identificaron en las fotografías aéreas. Las estructuras contenidas en el tercer grupo (N18°W/83°E) corresponden principalmente a fracturas y algunas fallas y controlan la formación de muchos cauces secundarios. Los rasgos de este grupo generalmente son cortados por las fracturas del primero (N45°E/83°SE).

ESTIMACIÓN DE RIESGO CON BASE EN LA PENDIENTE Y LAS ESTRUCTURAS

Para analizar la pendiente de terreno se decidió que la escala más conveniente de los mapas para el análisis es de 1:10,000, a la cual se sobrepuso una malla de 100 metros por lado sobre la base topográfica. En cada elemento de la retícula se buscó la pendiente promedio. La Figura 23 muestra la red de análisis.

Al efectuar los contornos del Valor Empírico de Riesgo (R), se obtiene un mapa de valores de igual índice de inestabilidad que, como se observa en la Figura 24, los valores de índice mayor a 50 se distribuyen en varias partes de la zona.

Al comparar los mapas 7 y 9, se observa una concordancia entre los índices de más alto valor con las zonas de más alta densidad de estructuras y pendientes abruptas. Para la construcción de la Figura 24, el criterio seguido al dar forma final a los contornos fue el de otorgar mayor peso a la estructura geológica.

En sentido NE-SW, los cauces son paralelos a las fallas, mientras que en sentido NW30°SE, los arroyos se forman justamente sobre las fracturas.

Se observaron algunos movimientos de ladera antiguos justo en la intersección de estructuras. La corona de estos deslizamientos coincide en ocasiones las cabeceras curvas de arroyos. Las fluencias de terreno se asocian por lo general a fallas y pendientes fuertes.

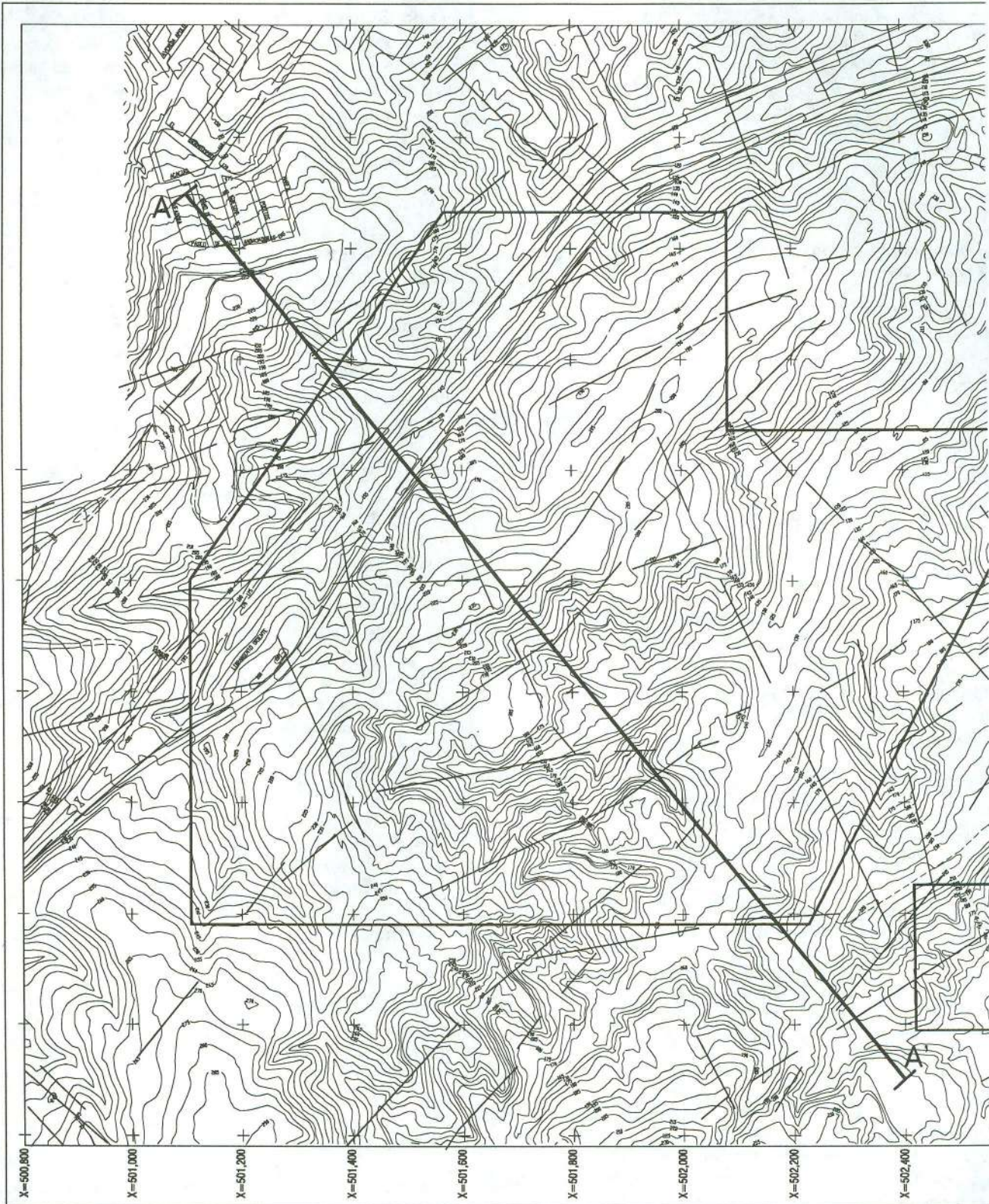


Figura 21. Interpretación fotogeológica de lineamientos estructurales en Cañada Verde-Colonia Sánchez Taboada. Se utilizaron fotografías aéreas del INEGI (1973) escala 1:30,000. Las áreas indicadas muestran las zonas donde se efectuó reconocimiento de campo.

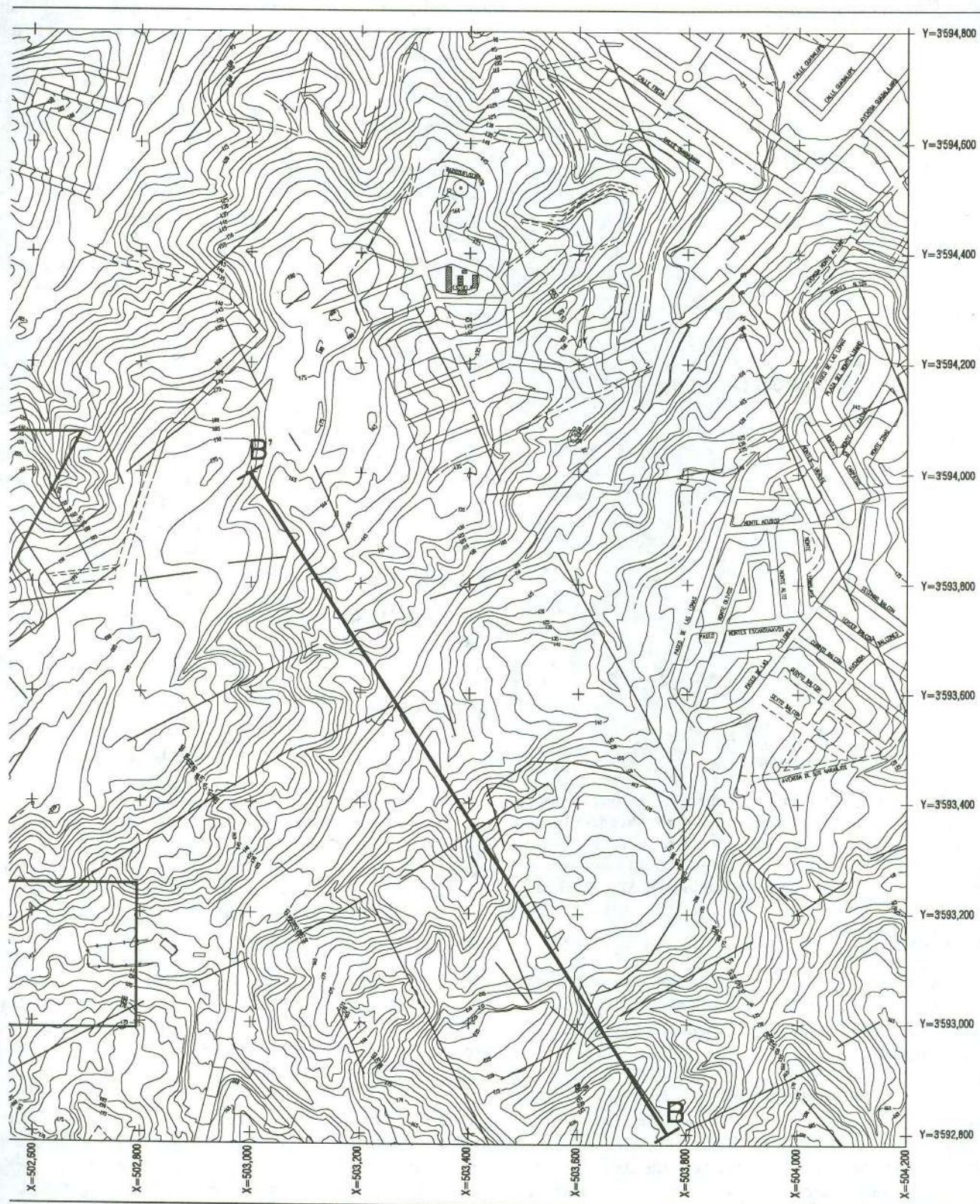


Figura 21. Continuación

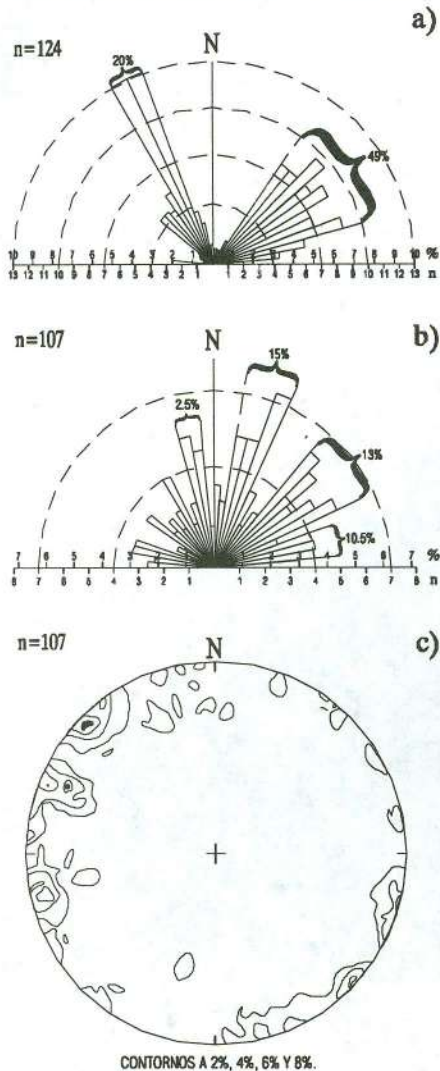
Cañada Verde-Sánchez Taboada

Figura 22. a) Roseta de lineamientos estructurales interpretados de fotografías aéreas en el Área de Cañada Verde-Sánchez Taboada. b) Roseta de fallas y fracturas cartografiadas a detalle en el Área de Cañada Verde-Sánchez Taboada. c) Estereograma de fallas y fracturas cartografiadas a detalle en el Área de Cañada Verde-Sánchez Taboada.

EFFECTO DE SITIO.

Esta área fue seleccionada debido a los numerosos reportes de deslizamientos de ladera. A continuación se describe y explica uno de ellos, ubicado en Callejón Cristóbal Colón No. 1, Colonia Sánchez Taboada.

El deslizamiento, que localmente se muestra como una falla de talud (Figura 25), ocurrió aproximadamente a las 10:30 am del sábado 9 de enero de 1993. Según los vecinos de la zona, en los meses anteriores a las lluvias se notaron fracturas y combamiento en la barda que funcionaba como muro de contención (Figura 26). En el límite poniente del predio se observa una falla normal con rumbo N52°W buzando 71° al norte, con ligero componente lateral derecho. Esta misma

estructura fue reconocida en los cortes de otros lotes 50 m al NW y en pequeños afloramientos en la Avenida Cruz del Sur. La falla pone en contacto a conglomerados medianamente litificados intercalados con horizontes de arenas gruesas al alto de la falla; al bajo de la falla se encuentran areniscas medianamente consolidadas. La zona de cizallamiento en el bloque de techo es hasta de 2 m, en los cuales se encuentran clastos imbricados de diferentes tamaños. La Figura 25 presenta la cartografía geológica detallada del sitio.

En las secciones A-A' y B-B' (Figura 26), se explica a que se debe la falla de talud: la máxima pendiente del terreno es alrededor del 14%. La falla normal es un rasgo natural antiguo en el sitio, lo cual le confiere al terreno un valor de inestabilidad. Al modificarse la pendiente original para construir las viviendas, se incrementó localmente el valor de inestabilidad. Tanto el muro de contención destruido como el que limita el corte del talud al norte (Figura 26) no tienen drenaje, lo que provocó que el agua no tuviera salida y produjera un efecto de subpresión en los sedimentos y en el muro. La casa habitación que se muestra en ambas secciones es de concreto, rígida y pesada. De esa forma, la suma de los factores anteriores, encabezados por la inestabilidad conferida a la zona por la falla normal y el aumento en la pendiente de terreno, disparados por la sobresaturación de agua de las lluvias, originaron la destrucción del talud y la consecuente destrucción de las obras civiles. Este sitio ilustra con detalle el significado de las zonas de alto Valor Empírico de Riesgo mostradas en las Figuras 14, 19 y 24.

Nota. Durante el estío de 1995, se visitó esta zona y se observó que una represa de piedra y concreto, de aproximadamente 25 m de longitud, está plegada y fracturada, lo que indica que el sitio aún después de la crisis de 1993 sigue deformándose.

SÍNTESIS Y CONCLUSIONES

La Ciudad de Tijuana se localiza en una zona tectónicamente activa influenciada por las fallas Vallecitos, Banco Coronado, Rose Canyon y La Nación, principalmente. Todas estas estructuras tienen componente de desplazamiento lateral derecho, se orientan hacia el NW y son sísmicamente activas.

La zona urbana se asienta sobre sedimentos terciarios pobremente consolidados, incompetentes y deleznales de las Fms. San Diego y Lindavista. Estas formaciones sobreyacen a rocas del Cretácico marcadamente más competentes, que afloran hacia el sur y este de la ciudad.

Geomorfológicamente, el norte de la ciudad se caracteriza por mesas, la parte central está dominada por la planicie del Río Tijuana y hacia el sur el relieve está formado por lomeríos alargados, fuertemente bisectados.

Los principales riesgos naturales reconocidos son los debidos a inundaciones, movimientos de ladera y sísmicos (potenciales).

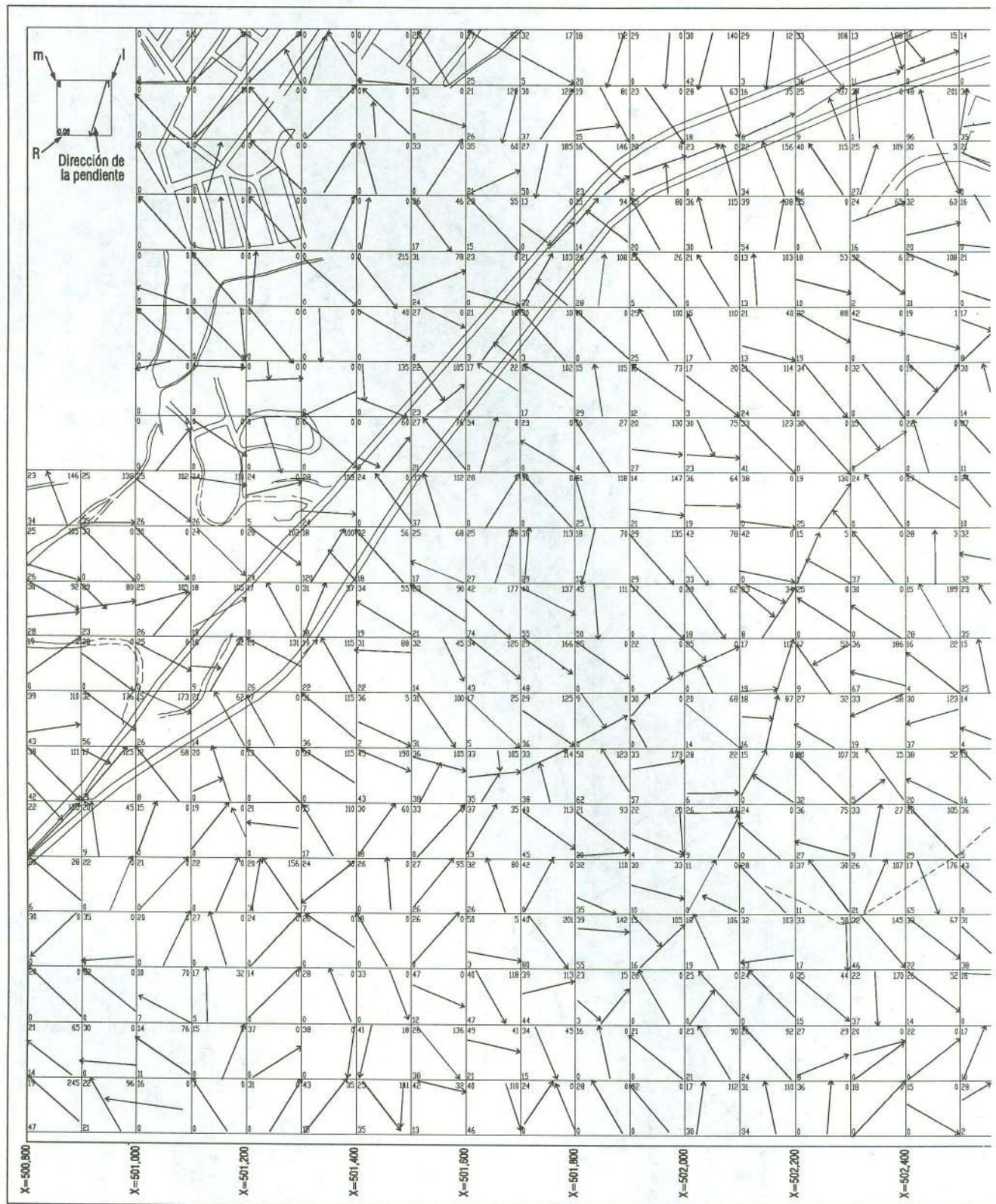


Figura 23. Áreas de medición de pendiente (m), suma de la longitud de estructuras de fallas y fracturas (I) y valor empírico de riesgo (R) en el Área Cañada Verde-Colonia Sánchez Taboada. Los cuadros equivalen a 100x100 metros.

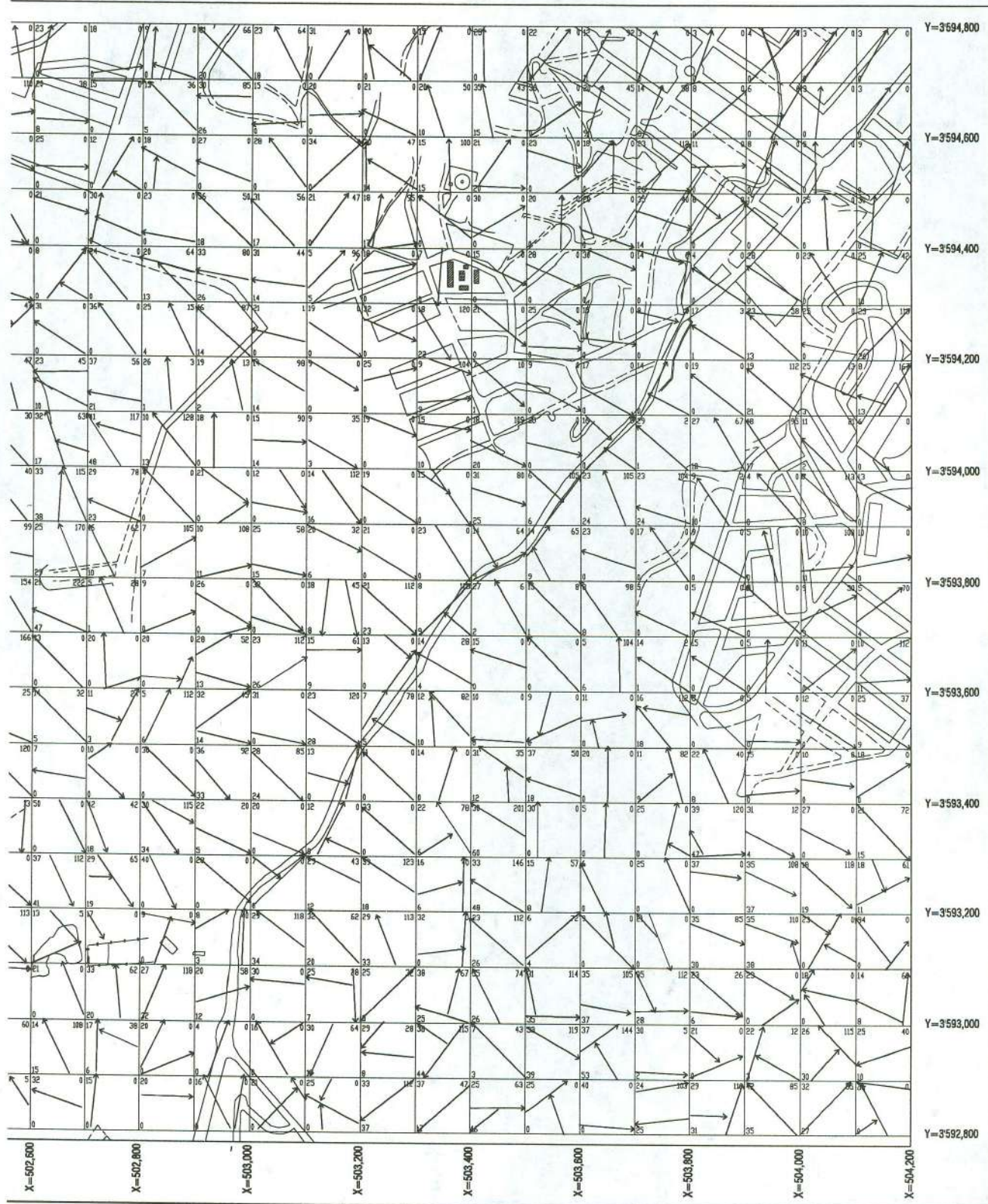


Figura 23. Continuación.



Figura 24. Contornos de intervalos de Valores de Riesgo en el Área Cañada Verde-Colonia Sánchez Taboada, tomados de la Figura 23 Ver texto.

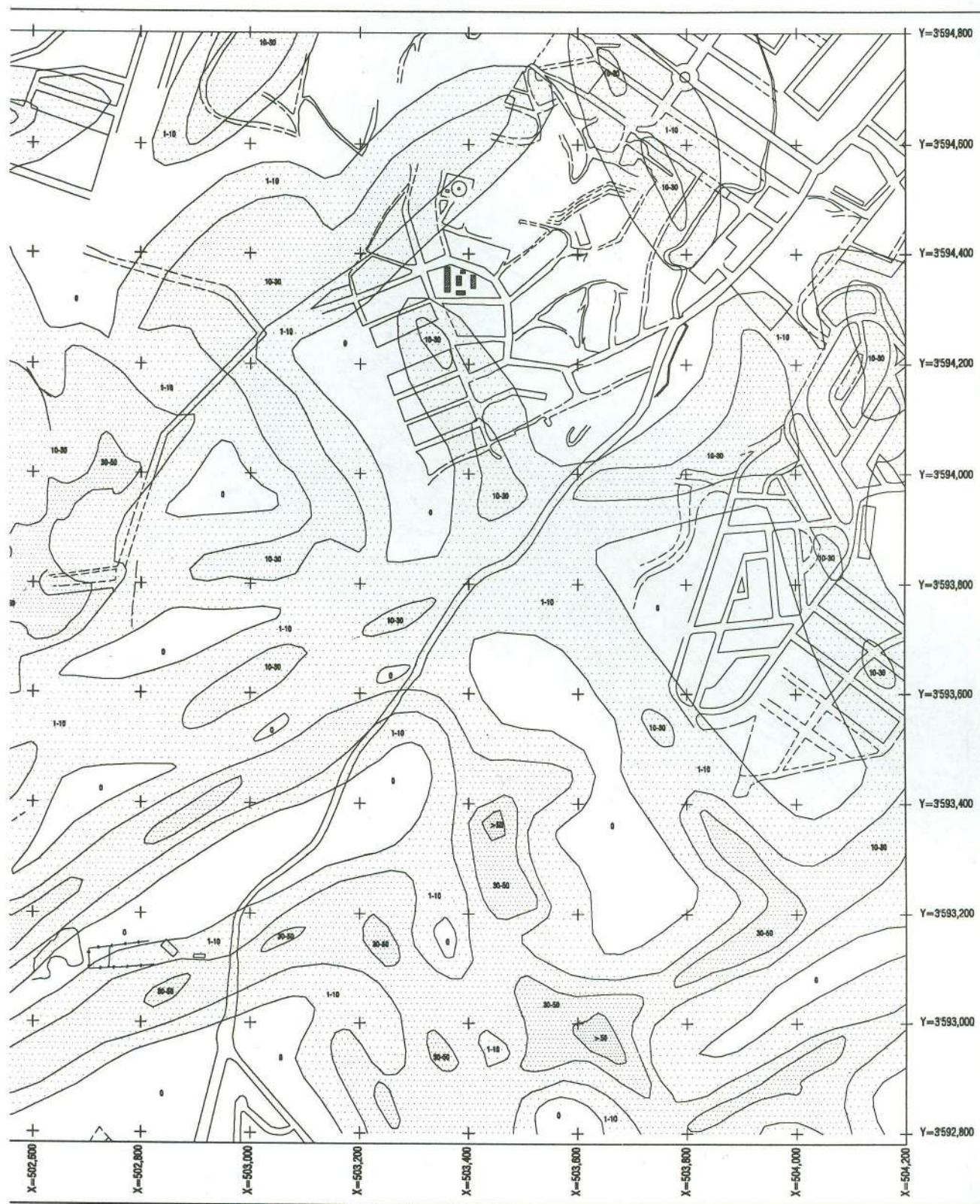


Figura 24. Continuación

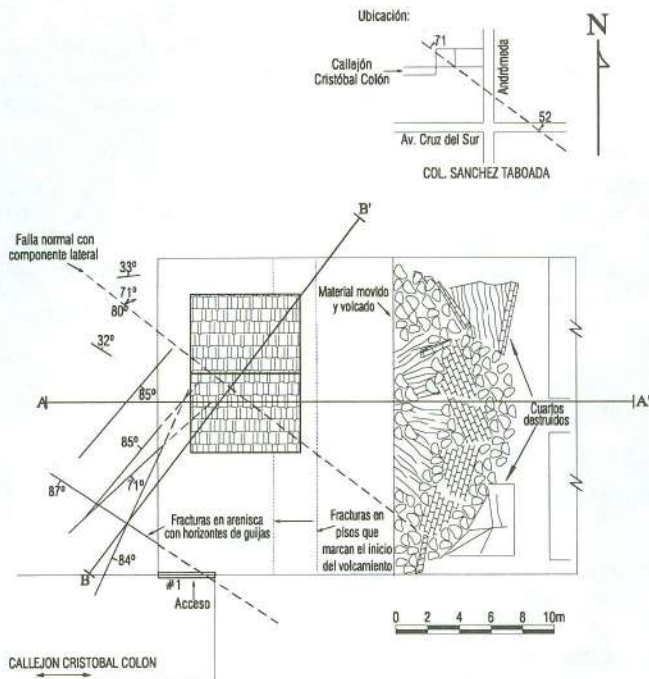


Figura 25. Cartografía geológica de detalle del predio ubicado en el Callejón Cristóbal Colón #1, Colonia Sánchez Taboada, a partir de la falla de talud del 9 de Enero de 1993.

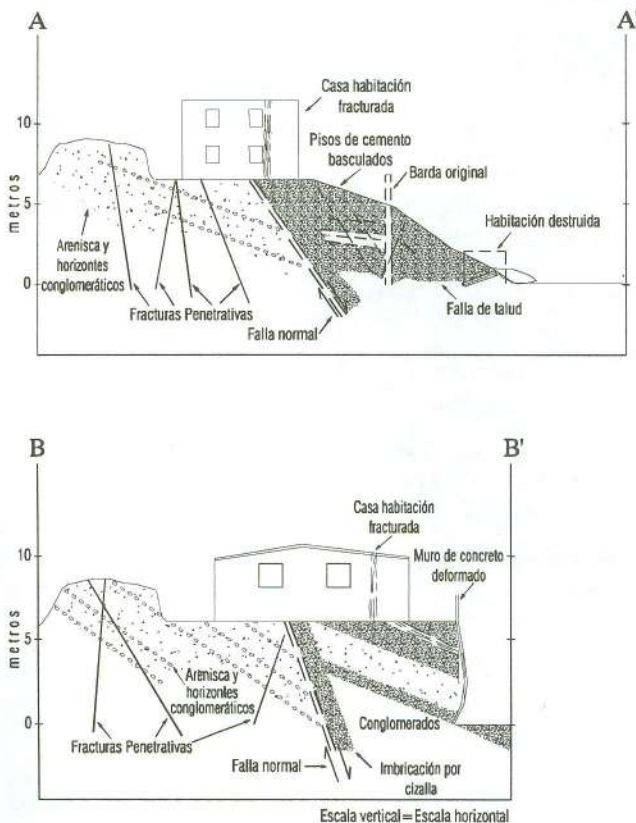


Figura 26. Secciones A-A' viendo al norte y B-B' viendo al NW, mostrando la asociación directa de la falla de talud al fallamiento geológico normal y los efectos en obras civiles. Callejón Cristóbal Colón # 1, Colonia Sánchez Taboada.

El riesgo geológico en Tijuana está asociado a un conjunto de factores, entre los que destacan los lineamientos estructurales (fallas y fracturas), la pendientes del terreno y el tipo de litología. En este trabajo se identificaron las zonas de riesgo de acuerdo con una condicionante lógica que involucra los tres factores citados.

La estimación de riesgo se efectuó a dos escalas distintas, cada una evaluada con distinto método. A escala regional (1:75,000), el trabajo se basó en la fotointerpretación geológica, modelos digitales de elevación y geología regional. La información fue manejada en forma matricial mediante un sistema de información geográfico. La evaluación de detalle se efectuó con base en fotointerpretación a pequeña escala (1:15,000 y 1:30,000), evaluación de pendientes (escala 1:7,500 y 1:5,000) y cartografía geológica detallada escala 1:2,000.

A partir de la evaluación regional de vulnerabilidad, se reconoce gran cantidad de sitios que pueden calificarse como riesgosos. Por su distribución geográfica se ubican en dos grandes zonas: en los taludes o cercanos a los rompimientos de pendiente de la Mesa de Otay y en las laderas y zonas de fuerte pendiente de los arroyos de la porción suroeste (alta bisección de drenaje) de la Ciudad de Tijuana.

A detalle se trabajaron las áreas de El Pastejé, El Pato y Cañada Verde-Sánchez Taboada. En ellas se efectuó una estimación cuantitativa empírica del riesgo a partir de la pendiente, la longitud total de fallas y fracturas y el producto aritmético de los valores numéricos de los factores anteriores, que define el Valor Empírico de Riesgo (VER).

En el Área El Pastejé se localizaron varias zonas de alto VER, tres de las cuales coinciden con lugares en los que se documentaron deslizamientos rotacionales, en otra se localizó fallamiento probablemente activo que ha provocado la destrucción de algunas construcciones. Las fluencias de suelo se ubican en zonas de alto y medio VER.

En el Área El Pato se interpretaron varias zonas de alto VER. La más extensa se ubica en la parte sur del cañón, donde se produjo un deslizamiento rotacional de unos 200 m de cabecera a principios de febrero de 1993. Algunas de las zonas en las que se presentan altos valores aún no han sido urbanizadas. Las fluencias de suelos coinciden con zonas de alto y mediano VER.

En el Área de Cañada Verde-Sánchez Taboada, las zonas de alto VER se encuentran asociadas a zonas de alta pendiente, que coinciden generalmente con zonas falladas o fracturadas. Por lo general, las zonas inestables son cercanas a la parte alta de las laderas y muchas de ellas aún no han sido urbanizadas. En Cañada Verde no se encontraron deslizamientos rotacionales recientes; en cambio fueron reconocidos accidentes antiguos, los cuales coinciden con las zonas de altos valores. Las fluencias de suelo también coincidieron con valores altos y medios del índice de riesgo.

Es necesario que en la planeación del crecimiento de la

Ciudad de Tijuana se incluya la variable de riesgo. La estimación regional que se presenta puede aportar esa base para orientar el crecimiento y evitar asentamientos humanos en zonas inestables.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se realizó en 1993 con financiamiento del XIV Ayuntamiento de Tijuana. Agradecemos a los Arquitectos Diego Moreno y Luis A. López, Director de Planeación de Desarrollo Urbano y Ecología y Subdirector de Planeación y Proyectos, respectivamente, por el permiso otorgado para la publicación de estos resultados. Participaron en diferentes etapas del proyecto: Gerardo Chávez, Ramón Mendoza, Oliva Castro y Jonás Basabe. Agradecemos a Luis Mendoza, del Depto. de Sismología del CICESE, el habernos introducido en el problema geológico de Tijuana, las discusiones continuas en el área fueron muy provechosas. También fueron muy importantes los comentarios de Gerardo Bocco, quién paralelamente desarrolló otros aspectos sobre riesgos naturales en la ciudad. Agradecemos finalmente a Héctor Romero y Carlos Suárez por el estricto arbitraje que permitió mejorar notablemente el manuscrito original.

REFERENCIAS

- Ashby, J. R., 1989, A resume of the Miocene stratigraphic history of the Rosarito Beach Basin, Northwestern Baja California, Mexico, in P.L. Abbott, editor, *Geologic Studies in Baja California: Pacific Section, Society of Economic Paleontologists and Mineralogists*, Los Angeles, California, p. 37-45.
- Beal, C. H., 1948, Reconnaissance of the geology and oil possibilities of Baja California, Mexico: *Geological Society of America Memoir* 31, 138 p.
- Berger, V. and Schug, D.L., 1991, Probabilistic evaluation of seismic hazard in the San Diego - Tijuana metropolitan region, in *Environmental Perils San Diego Region*, P.L. Abbott and W.J. Elliott, editors, *Geological Society of America Annual Meeting*, p. 89-100.
- Brune, J.N., Simons, S.R., Rebollar, C. and Reyes, A. 1979. Seismicity and faulting in northern Baja California, in P.L. Abbott and W.J. Elliott, eds., *Earthquakes and other perils - San Diego region: San Diego Association of Geologist Guidebook*, p. 83-100.
- Delgado-Argote, L.A., Martín-Barajas, A., Mendoza-Borunda, R., Rendón-Márquez, G. y Frías-Camacho, V.M. 1993. Análisis de riesgo geológico en la Zona "El Pastejé", Arroyos Libertad y La Mona, en Tijuana, Baja California. *Ingeniería, Órgano oficial de información del Colegio de Ingenieros Civiles de Tijuana*, A.C.v. 1, No. 2, p. 10-22.
- Deméré, T. A., 1982, Review of the lithostratigraphy, biostratigraphy and age of the San Diego Formation, in P.L. Abbott, editor, *Geologic Studies in San Diego Association of Geologists*, p. 127-134.
- Deméré, T. A., 1983, The Neogene San Diego Basin: A review of the marine Pliocene San Diego Formation, in D.K. Laure and R.J. Steel, editors, *Cenozoic Marine Sedimentation, Pacific Margin*, U.S.A.: Pacific Section, Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, p. 187-195.
- Fisher, P.J. and Mills, G.I., 1991, The offshore Newport-Inglewood-Rose Canyon, fault zone, California: Structure, segmentation and tectonics, in *Environmental Perils San Diego Region*, P.L. Abbott and W.J. Elliott, editors, *Geological Society of America Annual Meeting*, p. 17-36.
- Flynn, C. J., 1970, Post-batholithic geology of the La Gloria-Presa Rodríguez area, Baja California, Mexico: *Geological Society of America Bulletin*, v. 81, p. 1789-1806.
- Gastil, R. G., R. P. Phillips, and E. C. Allison, 1975, Reconnaissance geology of the State of Baja California, *Geological Society of America Memoir* 140, 170 p.
- Geographic Resources Analysis Support System, GRASS. Version 4.0. 1991. Public domain, image processing and geographic information system developed at U.S. Army Corps of Engineers Construction Engineering Research Laboratory.
- Gunther, F. J., 1964, Foraminifera of the San Diego Formation, Mount Soledad and Pacific Beach (unpublished Senior Report), Department of Geological Sciences, San Diego State University, 165 p.
- Hinojosa-Corona, A., Delgado-Argote, L.A., Chávez-Velasco, G., and Aragón-Arreola, M., Estimation of the geologic risk caused by landslides in the city of Tijuana, Baja California, Mexico, using a geographic information system, *Geofísica Internacional* (sometido, 1995).
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. 1976. Carta Geológica La Presa I11D71 escala 1:50,000. 1a. edición.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. 1977. Carta Geológica Murúa I11D61 escala 1:50,000. 1a. edición.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. 1978. Carta Geológica Tijuana I11C69 escala 1:50,000. 1a. edición.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. 1985. Carta Topográfica Tijuana I11C69 escala 1:50,000. 2a. impresión de la 1a. edición de 1977.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. 1985. Carta Topográfica Murúa I11D61 escala 1:50,000. 3a. impresión de la 1a. edición de 1977.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. 1985. Carta Topográfica La Presa I11D71 escala 1:50,000. 3a. impresión de la 1a. edición de 1975.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. 1988. Carta Topográfica El Rosarito I11C79 escala 1:50,000. 2a. impresión de la 1a. edición de 1980.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Sin año. Modelo Digital del Terreno correspondiente a los cuadrantes 32° y 33° latitud norte y 118° al 116° longitud oeste, formato estándar, 1600 bpi.

- Kennedy, M. L., and Tan, S.S. 1977, Geology of the National City, Imperial Beach and Otay Mesa quadrangles, Southern San Diego metropolitan area, California: California Division of Mines and Geology, Map Sheet 29.
- Legg, M.R., 1985, Geologic structure and tectonics of the inner continental borderland offshore northern Baja California, Mexico, Ph.D. dissertation, University of California at Santa Barbara, Santa Barbara, California, 410 p.
- Legg, M.R. and Kennedy, M.L. 1979. Faulting offshore San Diego and northern Baja California, in P.L. Abbott and W.J. Elliott, editors, Earthquakes and other perils San Diego region, San Diego Association of Geologists Guidebook, p. 29-46.
- Legg, M. R., Wong, V., and Suárez, F., 1991, Geologic structure and tectonics of the inner continental borderland of Northern Baja California, in The Gulf and Peninsular Province of the Californias, J.P. Dauphin and B.R.T. Simoneit, editors, The American Association of Petroleum Geologists, Memoir 47, p. 145-178.
- Minch, J. A., 1967, Stratigraphy and structure of the Tijuana-Rosarito Beach area, northwestern Baja California, Mexico, Geological Society of America Bulletin, v. 78, p. 1155-1178.
- Minch, J. A., J. R. Ashby, T. A. Deméré, and H. T. Kuper, 1984, Correlation and depositional environments of the middle Miocene Rosarito Beach Formation of northwestern Baja California, Mexico, in J.A. Minch, and J.R. Ashby, editors, Miocene and Cretaceous Depositional Environments, Northwestern Baja California, Mexico, Pacific Section, American Association of Petroleum Geologists, v. 54, p. 33-46.
- Rockwell, T.K., Lindvall, S.C., Haraden, C.C., Hirabayashi, C.K., and Baker, E., 1991, Minimum Holocene slip rate for the Rose Canyon Fault in San Diego, California, in Environmental Perils San Diego Region, P.L. Abbott and W.J. Elliott, editors, Geological Society of America Annual Meeting, p. 37-46.
- Suárez-Vidal, F., Armijo, R., Morgan, G., Bodin, P., and Gastil, G., 1991, Framework of recent and active faulting in Northern Baja California, in The Gulf and Peninsular Province of the Californias, J.P. Dauphin and B.R.T. Simoneit, editors, The American Association of Petroleum Geologists, Memoir 47, p. 285-300.
- Teng, L.S. and Gorsline, D.S., 1991, Stratigraphic framework of the continental borderland basins, Southern California, in The Gulf and Peninsular Province of the Californias, J.P. Dauphin and B.R.T. Simoneit, editors, The American Association of Petroleum Geologists, Memoir 47, p. 127-144.