

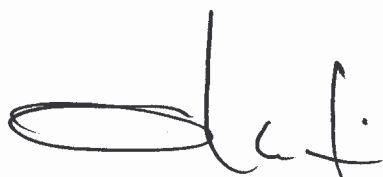
TESIS DEFENDIDA POR

Luz Selene Lino Escobedo

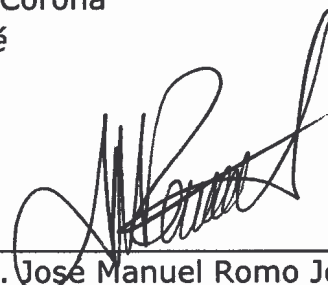
Y APROBADA POR EL SIGUIENTE COMITÉ



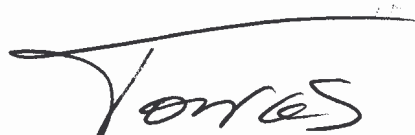
M. C. Alejandro Hinojosa Corona
Director del Comité



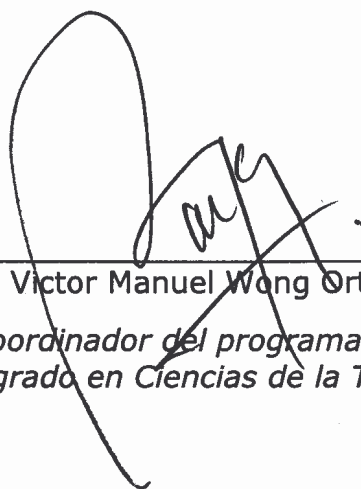
Dr. Arturo Martín Barajas
Miembro del Comité



Dr. José Manuel Romo Jones
Miembro del Comité



Dr. Jorge Torres Rodríguez
Miembro del Comité



Dr. Victor Manuel Wong Ortega
*Coordinador del programa de
posgrado en Ciencias de la Tierra*



Dr. Raúl Ramón Castro Escamilla
Director de Estudios de Posgrado

23 de Junio de 2006

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



**PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS
EN CIENCIAS DE LA TIERRA
CON ORIENTACIÓN EN GEOLOGÍA**

**ABANICO ALUVIAL DEL ARROYO MATOMÍ, BAJA CALIFORNIA; ANÁLISIS
LITOLÓGICO, GEOMORFOLÓGICO, MULTITEMPORAL Y ESPECTRAL”**

TESIS

que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de
MAESTRO EN CIENCIAS

Presenta:

LUZ SELENE LINO ESCOBEDO

Ensenada, Baja California, México, Junio del 2006.

RESUMEN de la tesis de Luz Selene Lino Escobedo, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de **MAESTRO EN CIENCIAS** en **CIENCIAS DE LA TIERRA** con especialidad en **GEOLOGIA**. Ensenada, Baja California, México. Junio del 2006.

ABANICO ALUVIAL DEL ARROYO MATOMÍ, BAJA CALIFORNIA; ANÁLISIS LITOLÓGICO, GEOMORFOLÓGICO, MULTITEMPORAL Y ESPECTRAL.

Resumen aprobado por:



M.C. Alejandro Hinojosa Corona
Director de Tesis

El abanico aluvial del arroyo Matomí se ubica al Noreste de Baja California en la vertiente oriental del escarpe del Golfo de California donde se depositan los sedimentos de las cuencas Matomí, el Canelo y la Cantera con superficies de captación de 545, 307 y 152 Km² respectivamente, contribuyendo rocas metasedimentarias y batolíticas (Paleozoico-Cretácico), volcanoclásticas (Mioceno), sedimentos marinos y no marinos del Plioceno y depósitos aluviales (Cuaternario).

A pesar de que el área de estudio posee un clima desértico, vegetación escasa y que su precipitación media anual es baja - 100mm, el área está sujeta ocasionalmente a eventos de alta precipitación como el paso de huracán Nora en el año de 1997, donde la estación meteorológica mas cercana registro 300mm en 24hrs. Se exploran los efectos de Nora a través de un análisis multitemporal de 3 imágenes Landsat, 2 anteriores al evento (1987 y 1988) y una posterior a éste (2001). Se fotointerpretaron las imágenes multitemporales a través de compuestos en falso color y se aplicó la técnica de componentes principales para resaltar los cambios en el abanico. Se identificaron las zonas afectadas por una fuerza hidrodinámica en el flujo superficial que perturbara la exposición de los clastos en el cauce, induciendo cambios entre las imágenes integradas por el sensor antes y después del paso del huracán.

Para el análisis litológico, geomorfológico y espectral del abanico se utilizaron imágenes hiperespectrales del sensor aerotransportado MASTER con 50 bandas espectrales que abarcan desde el visible (0.44 µm) hasta el infrarrojo térmico (13 µm). En compuestos de falso color de las imágenes MASTER con resolución espacial de 5m, se seleccionaron zonas a muestrear en campo donde se calcularon índices de contenido de roca que describen las rocas predominantes en cada sitio. Para cada sitio muestreado en campo, se extrajeron las firmas espectrales en las 50 bandas registradas por el sensor MASTER. La mayor variación en los vectores espectrales ocurre en la región del visible e infrarrojo reflectivo del espectro. A través de la fotointerpretación de compuestos en falso color de un mosaico de imágenes MATER, se generó un mapa geomorfológico que incluye la red trezada de cauces de la hidrología superficial en el abanico aluvial.

Palabras Clave: Arroyo Matomí, abanico aluvial, barniz del desierto, análisis multitemporal y espectral, geomorfológico, litológico.

ABSTRACT from the thesis of **Luz Selene Lino Escobedo**, presented as a partial requirement to obtain the **MASTER IN SCIENCES** degree on **EARTH SCIENCES** with a specialty in **GEOLOGY**. Ensenada, Baja California, Mexico. June 2006.

THE ARROYO MATOMI ALLUVIAL FAN IN BAJA CALIFORNIA; A LITHOLOGIC, GEOMORPHOLOGIC, MULTITEMPORAL AND SPECTRAL ANALYSIS.

The arroyo Matomi alluvial fan is located to the Northeast of Baja California peninsula, at the foothills of the Gulf of California escarpment, where sediments from the Matomi, Canelo and Cantera basins are deposited, with catchment areas of 545, 307 and 152 Km² respectively. Sediment contributions in such basins are from Paleozoic to Cretaceous metasedimentary and batholithic rocks, Miocene volcanoclastic rocks, Pliocene marine and non-marine sediments, and Quaternary alluvial deposits.

Despite the arid climate in the study area, with scarce vegetation and low mean annual rainfall (< 100mm), the area is subject to occasional intense precipitation events, e.g. Hurricane Nora in 1997, in which the nearest meteorological station registered 300mm in 24 hours. The Nora effects are explored by means of a multitemporal analysis of 3 Landsat images: 2 prior to the event (1987 and 1988) and one after the hurricane (2001). False color composites of the Landsat images were photo-interpreted, zones affected by a hydrodynamic force were identified, through the disturbance of clasts within the stream bed, changing the exposure surface of rocks that had developed desert varnish, inducing changes between images integrated by the sensor before and after the meteorological event. Also, in order to highlight changes within the alluvial fan, the standard and selective versions of the principal components technique were applied to the multitemporal images.

For the lithologic, geomorphologic, and spectral analysis of the alluvial fan, hyper-spectral images from the airborne MASTER sensor were used, with 50 spectral bands from the visible (0.44 μm) to the thermal infrared (13 μm). In false color composites of MASTER images with 5m spatial resolution, field sampling zones were selected, in which rock content indexes were calculated describing each site's predominating rocks. For each sampled site in the field, spectral firms registered by the MASTER sensor were extracted. The largest variation in spectral vectors occurs in the visible and reflective infrared spectral region. A geomorphologic map was generated through photo-interpretation of false color composites of a MASTER image mosaic, extracting the braided network of stream beds.

Keywords:

Arroyo Matomí, alluvial fan, desert varnish, multitemporal and spectral analysis, geomorphologic, lithologic.

Con todo mi amor y cariño para ustedes

Dios

Por darme esta vida y la oportunidad de llegar hasta aquí y por los días que vienen en camino.

Alicia y José Luis

A mis padres.

Gracias por darnos a mis hermanos y a mí el regalo más lindo que es la vida, apoyarnos y estar siempre unidos como una gran familia. Mi admiración y gratitud para ustedes, gracias a ustedes soy lo que soy y eh llegado hasta aquí, los quiero mucho.

Carpio

A mi esposo.

Te admiro por como eres, una persona inteligente, sencilla, trabajadora y de buen corazón. Gracias por llegar a mi vida y hacerme feliz con tu sola presencia y por estar a mi lado en las buenas y malas, sobre todo por emprender juntos el camino de la vida. Te amo.

Cindy - Rafael, Chevis - Liz

A mis hermanos.

A ustedes, gracias por su incondicional apoyo desde que era una niña hasta el día de hoy. Por ser los mejores hermanos del mundo y ser un gran ejemplo para mí.

Noelia, Alix, Jr, Yohalis e Irandi

Mis sobrinos

A ustedes bebes, por ser las alegrías más grandes de mi vida y de toda la familia. Los adoro con toda mi alma.

AGRADECIMIENTOS.

A mi director de tesis M.C. Alejandro Hinojosa Corona, por su gran apoyo, enseñanzas y colaboración en esta tesis.

A los miembros del comité de tesis, Dr. Jesús Arturo Martín Barajas, Dr. Jorge Torres Rodríguez y Dr. José Manuel Romo Jones, por su gran ayuda, consejos y comentarios para esta tesis.

A Margarita Almeida Vega y Juan Manuel Espinosa Cardeña por su amistad y apoyo a Carpio y a mí. A Delia Castellanos por darme la oportunidad de entrar a este mundo de los IMIPS. A Dalila Moreno y su pequeña Camila por su gran apoyo. A todos los chicos del IMIP, cesar Admón., cesar GIS, Patushki, Maguys, Dr Aramburo y Javier por su amistad y apoyo. A Jesús Mojarro Bermudez por el apoyo técnico en el equipo de cómputo, Octavio Meillon Menchaca por su ayuda.

A todos mis profesores, compañeros y amigos, por la confianza y apoyo que depositaron durante mi estancia en el posgrado.

Al Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por su apoyo.

CONTENIDO

	Página
I. INTRODUCCIÓN.....	1
<i>I.1. Objetivos.....</i>	6
<i>I.2. Marco geográfico y geológico.....</i>	7
I.2.1. Geología del área.....	7
I.2.2. Fisiografía.....	8
I.2.3. Cuenca hidrológica.....	8
<i>I.3. Generalidades de los depósitos aluviales.....</i>	11
I.3.1. Abanicos aluviales.....	11
I.3.2. Barniz del desierto.....	13
<i>I.4. Aspectos generales de los sensores remotos.....</i>	16
I.4.1. Sensor LANDSAT 5 TM y Sensor LANDSAT 7 ETM.....	16
I.4.2. Sensor ASTER.....	17
I.4.3. Sensor MODIS.....	18
I.4.4. Sensor MASTER.....	19
<i>I.5. Materiales y Métodos.....</i>	22
II. METODOS.....	27
<i>II.1 Pre-procesamiento.....</i>	27
II.1.1. Georeferencia de imágenes MASTER.....	27
<i>II.2. Procesamiento.....</i>	31
II.2.1. Composición en falso color.....	31
II.2.2. Análisis de componentes principales.....	33
II.2.3. Análisis litológico.....	38
II.2.4. Firmas espectrales.....	40
III. ANALISIS GEOMORFOLOGICO DEL ABANICO ALUVIAL DEL ARROYO MATOMI.....	44
<i>III.1. Descripción general.....</i>	44
<i>III.2. Cuencas hidrográficas.....</i>	48
<i>III.3. Descripción de las geoformas.....</i>	51
<i>III.4. Sistema de drenaje.....</i>	54
<i>III.5. Geomorfología.....</i>	56
IV. ANALISIS ESPECTRAL Y LITOLOGICO DEL ABANICO ALUVIAL DEL ARROYO MATOMI.....	60
<i>IV.1. Selección de zonas de interés.....</i>	61
<i>IV.2. Clasificación de clastos en grupos.....</i>	63
<i>IV.3. Índices de contenido de roca.....</i>	66
IV.3.1. Caracterización litológica del AM.....	66
IV.3.2. Caracterización litológica del AEC.....	69

CONTENIDO (continuación)

	Página
IV.3.3. Caracterización litológica del ALC.....	71
IV.4. Firmas espectrales.....	72
IV.4.1. Comparación de firmas espectrales.....	72
V. EFECTOS DEL HURACAN NORA EN EL ABANICO ALUVIAL DEL ARROYO MATOMI.....	83
V.1. Fotointerpretación de los cambios entre las imágenes 1987 vs. 1988, 1988 vs. 2001.....	84
V.2. Análisis multitemporal por componentes principales (ACP).....	89
V.2.1. Análisis estándar de CP a imágenes multitemporales.....	90
V.2.2. Análisis multitemporal por el método selectivo deACP.....	96
VI. DISCUSIÓN.....	103
VI.1. Análisis litológico.....	103
VI.1. Efectos del Huracán Nora.....	105
CONCLUSIONES.....	109
LITERATURA CITADA.....	111
ANEXO A.....	119
Glosario de acrónimos.....	119
ANEXO B.....	121
Características técnicas del sensor MASTER.....	121
Claves y coordenadas de los sitios muestreados en campo.....	122
Características técnicas de los sensores, ASTER, Landsat TM y ETM.....	124

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura</i>		Página
1	Localización del área de estudio. El abanico aluvial del Arroyo Matomí (AAAM) se denota con el rectángulo color negro, los puntos muestran los campos turísticos, el cuadro ubica el pozo y la línea negra muestra la carretera estatal número 5 que comunica San Felipe y Puertecitos.....	3
2	Imagen Landsat TM 2004, RVA 7-4-2. El rectángulo punteado representa el AAAM. La línea amarilla muestra el área que comprende la cuenca del Arroyo Matomí, la línea azul denota la cuenca del arroyo El Canelo, la línea color rojo muestra la cuenca del arroyo La Cantera y por último la línea negra muestra la carretera estatal número 5.....	4
3	Trayectoria del Huracán Nora (HN) al cruzar la península de Baja California, en Septiembre de 1997. La línea negra indica el trayecto del huracán cada 3 hrs (tiempo GMT).....	5
4	Cuencas hidrológicas del estado de Baja California según INEGI 1995.....	9
5	Modelo digital de elevación, con las cuencas hidrológicas que drenan hacia el abanico aluvial del arroyo Matomí (AAAM). La línea amarilla delinea la frontera de la cuenca del arroyo Matomí (AM), la línea azul la cuenca del arroyo El Canelo (AEC) y por último la línea roja delimita la cuenca del arroyo La Cantera (ALC). En azul-gris claro denota la red de hidrología superficial.....	10
6 (a)	Este sitio se ubica sobre el ALC, a un lado del camino que comunica San Felipe de Puertecitos. En la figura se muestra la diferencia entre los clastos que desarrollaron barniz del desierto (lado izquierdo) y los clastos que fueron removidos por maquinaria (trascabo) del sitio y no presentan barniz (lado derecho).....	14

LISTA DE FIGURAS (continuación)

<i>Figura</i>	Página
6 (b) En esta fotografía se aprecia un flanco de la roca que desarrollo barniz del desierto. Sobre esta se tallaron petroglifos que exponen el color claro de la roca fresca. El petroglifo “Cartabón”, se relaciona al rancho contiguo a la zona, cerca del Rosario, B. C. Fotografía tomada por: Alfonso Carnoda.....	15
7 Ventanas espectrales de los sensores MASTER, ASTER, MODIS, LANDSAT TM y ETM y firmas espectrales de: agua de mar, suelo, andesita y bosque de coníferas (NASA, 1999). Ventanas espectrales: VNIR: Visible e infrarrojo cercano, SWIR: Infrarrojo de onda corta, MID: infrarrojo intermedio y TIR: infrarrojo térmico.....	21
8 Levantamiento aéreo sobre la PVP. El área de estudio es el recuadro ubicado al norte de Puertecitos.....	25
9 Esquema utilizado para mostrar la metodología a seguir en este trabajo.....	26
10 Determinación de puntos de control en sistema de coordenadas definidos para el mapa y la imagen que va a ser georeferida.....	28
11 Empleo de polinomios para la ubicación de los centros de los píxeles dentro de una malla previamente definida sobre el mapa (Richards, 1986).....	29
12 Sistema de muestreo realizado en campo.....	39
13 Fotografía del sitio M03 con el cuadrante montado sobre el aluvión del abanico del AM.....	39
14 Firmas espectrales de algunos tipos de coberturas presentes en la superficie terrestre, generadas de imágenes Landsat TM (García-Varela, 2000). Ventanas espectrales: VNIR: Visible e infrarrojo cercano y SWIR: Infrarrojo de onda corta.....	42

LISTA DE FIGURAS (continuación)

<i>Figura</i>		Página
15	Mapa geológico del AAAM. Obtenido de CETENAL 1977, cartas H11B67 y H11B77	45
16	Mapa geológico regional (tomado de Gastil et al., 1975) que muestra las cuencas del Arroyo Matomí (AM línea color negro), arroyo El Canelo (AEC en azul), arroyo La Cantera (ALC en amarillo) y la litología que drena a cada una de ellas.....	50
17	Localización del AT y AH sobre un abanico aluvial. Esquema obtenido de US Geological Survey (USGS).....	51
18	Los cuadrados color blanco representan los AT y AH y las líneas punteadas color blanco indican las áreas activas de la red hidrográfica de los arroyos. Esta figura se obtuvo a partir del sombreado del modelo digital de elevación de INEGI.....	53
19	Red hidrográfica del AM, la red se obtuvo a partir de la digitalización de la imagen mosaico MASTER.....	55
20	Red hidrográfica del AEC, la red se obtuvo a partir de la digitalización de la imagen mosaico MASTER.....	55
21	Red hidrográfica del ALC, la red se obtuvo a partir de la digitalización de la imagen mosaico MASTER.....	56
22	Mapa geomorfológico del AAAM, ubicado al Norte de Puertecitos, Baja California.....	59
23	Mosaico de imágenes MASTER, combinación 23-9-2 (RVA). Los cuadros representan las zonas visitadas en campo. Los cuadros en color rojo corresponden al AM; en color azul marino pertenecen al Arroyo el Canelo (AEC) y en color azul claro enmarcan las zonas del ALC.....	62

LISTA DE FIGURAS (continuación)

<i>Figura</i>		Página
24	Imagen del AM, los cuadros representan la localización de los sitios muestreados sobre el arroyo y las gráficas de pastel muestran el contenido de roca en cada sitio del AM (Imagen mosaico del sensor MASTER, RVA, 23- 9-2).....	67
25	Los cuadros representan los sitios muestreados sobre el arroyo y las gráficas muestran el contenido de tipo de roca en cada sitio del AEC (Imagen del mosaico MASTER, RVA 23- 9-2).....	70
26	Perfil longitudinal del ALC. Los cuadros representan los sitios muestreados sobre el arroyo y las graficas muestran el contenido de tipo de roca en cada sitio (Imagen del mosaico MASTER, RVA 23-9-2).....	71
27	Firma espectral del sitio M-06, correspondiente a la parte central del AM. Ventanas espectrales - VNIR: visible e infrarrojo cercano, SWIR: infrarrojo de onda corta, MID: infrarrojo medio y TIR: infrarrojo térmico.	73
28	Firmas espectrales (AM) de los sitios M-36, M-17A, M-06, M-01, M-21, M-20 y M-08 del AM; grupos espectrales: Visible, Infrarrojo Cercano, SWIR, MID y TIR.....	75
29	Firmas espectrales (AEC) de los sitios C-46, C-44 y C-67 del AEC; grupos espectrales: Visible, Infrarrojo Cercano, SWIR, MID y TIR.....	76
30	Firmas espectrales (ALC) de los sitios Ca-113, Ca-84 y Ca-93 del ALC; grupos espectrales: Visible, Infrarrojo Cercano, SWIR, MID y TIR.....	77
31	Firmas espectrales de los sitios M-36, M-17A, M-06, M-01, M-21, M-20 y M-08; grupos espectrales: Visible, Infrarrojo Cercano y SWIR.	79
32	Firmas espectrales de los sitios C-46, C-44 y C-67 del AEC; grupos espectrales: Visible, Infrarrojo Cercano y SWIR.....	80

LISTA DE FIGURAS (continuación)

<i>Figura</i>		Página
33	Firmas espectrales de los sitios Ca-113, Ca-84 y Ca-93 del ALC; grupos espectrales: Visible, Infrarojo Cercano y SWIR.....	81
34	Combinación de bandas 7-4-2 en compuestos a color RVA de dos imágenes LANDSAT TM del área de estudio tomadas 20/7/1987 (a) y 1/4/1988 (b). No se aprecian diferencias importantes en los rasgos geomorfológicos, ni de textura.....	86
35	Combinación de bandas 7-4-2 en compuestos a color RVA de dos imágenes LANDSAT del área de estudio. La figura a) de 1988, es anterior al paso del HN en 1997. La figura b) imagen 2001 posterior a Nora, los cuadros enmarcan las zonas que muestran cambios en el área de estudio.....	88
36	(a) CP1; par de imágenes 87 vs. 88, esta imagen corresponde a la componente con el mayor porcentaje de información (95.07%). (b) Imagen de la primer componente del par de imágenes del 88 vs. 01. Representa un 92.87% de variabilidad en las imágenes utilizadas para el ACP. En ella podemos observar que el AM presenta el tono de gris mas claro en toda la imagen, esto denota cambios relevantes en el arroyo	94
37	(a) CP2; par de imágenes 87 vs. 88. La segunda componente denota los principales cambios en la zona; en esta imagen la zona del abanico aluvial no se observan muchos cambios ya que presenta tonos de grises uniformes en toda el área. (b) Imagen de CP2 del par de imágenes 87 vs. 88. En el área del abanico aluvial se observa que los tres arroyos presentan diferentes tonos de gris. El arroyo que presenta grandes cambios es: el AM, ya que presenta un tono de gris oscuro	95

LISTA DE FIGURAS (continuación)

<i>Figura</i>		Página
38	a) Imagen de CP1 del par de bandas TM1 vs. ETM1 (88 vs. 01). b) Imagen de CP1 del par de bandas TM2 vs. ETM2 (88 vs. 01). c) Imagen de CP1 del par de bandas TM3 vs. ETM3 (88 vs. 01). d) CP1 del par de bandas TM4 vs. ETM4 (88 vs. 01). e) CP1 del par de bandas TM7 vs. ETM7 (88 vs. 01).....	100
39	CP2 de pares de bandas de imágenes del 1988(TM) vs. 2001(ETM). a) Imagen de CP2 del par de bandas TM1 vs. ETM1. b) Imagen de CP2 del par de bandas TM2 vs. ETM2. c) Imagen de CP2 del par de bandas TM3 vs. ETM3. d) CP2 del par de bandas TM4 vs. ETM4. e) CP2 del par de bandas TM7 vs. ETM7.....	102

LISTA DE TABLAS

Tabla		Página
I	Imágenes satelitales utilizadas.....	22
II	Descripción de los vuelos con datos utilizados en este trabajo....	24
III	Ternas y combinaciones de los sensores.....	33
IV	Bandas utilizadas para el ACP.....	90
V	Vectores propios (eigenvectores) obtenidos de ACP para el par de imágenes 87 vs. 88.....	91
VI	Eigenvectores obtenidos de ACP para el juego de imágenes 88 vs. 01.....	93
VII	Datos obtenidos del método selectivo de ACP para los siguientes pares de bandas de los años 1988 y 2001, TM1- ETM1, TM2 – ETM2, TM3 – ETM3, TM4 – ETM4 y TM7 – ETM7. Las bandas TM corresponden a 1988 y las ETM a 2001.....	97

I.-INTRODUCCIÓN

Los riesgos de inundación en el Noroeste de México son subestimados debido a la condición desértica, escasez de lluvia y a la ausencia de cauces bien definidos de los arroyos. Irónicamente, las inundaciones en esta región son muy severas y poderosas, exhibiendo cauces impredecibles y altas velocidades que usualmente ocurren con poco tiempo de advertencia. Estas inundaciones pueden causar considerable erosión en algunas áreas mientras depositan grandes cantidades de sedimento y escombros en otras.

El área de estudio en la franja litoral del norte de la península de Baja California (Figura 1 y 2) posee un clima desértico y su precipitación media anual es baja – 100 mm (CNA, 2004), sin embargo el área está sujeta al paso de huracanes provenientes del Golfo de California y el Océano Pacífico.

El 25 y 26 de septiembre de 1997 el Huracán Nora (HN) cruzó la Península de Baja California (Figura 3) causando daños en la infraestructura. Una de las zonas más afectadas debido al paso del huracán fue la carretera que pasa a través del abanico aluvial del Arroyo Matomí (AAAM), donde la precipitación registrada en la estación San Felipe para el 25 de Septiembre fue de 300 mm, tres veces superior a la media anual (CNA, 2004).

Farfán y Zehnder (2001) modelaron la evolución del HN y estimaron para el 25 de septiembre una precipitación cercana a los 200 mm en la cuenca del Arroyo Matomí (AM).

El AAAM es de importancia ya que en él se ubica el pozo que abastece de agua a los campos turísticos Delicias, Cristina y a la población de Puertecitos. El área es propicia para su análisis geomorfológico porque la geología ha sido estudiada por varios autores (Stock,1989; Martín-Barajas et al., 1995; Nagy, 1997; Fletcher et al, 1997; Noyola-Medrano, 1999; García-Puga, 2000), facilitando la identificación de las rocas y la clasificación de imágenes multiespectrales.

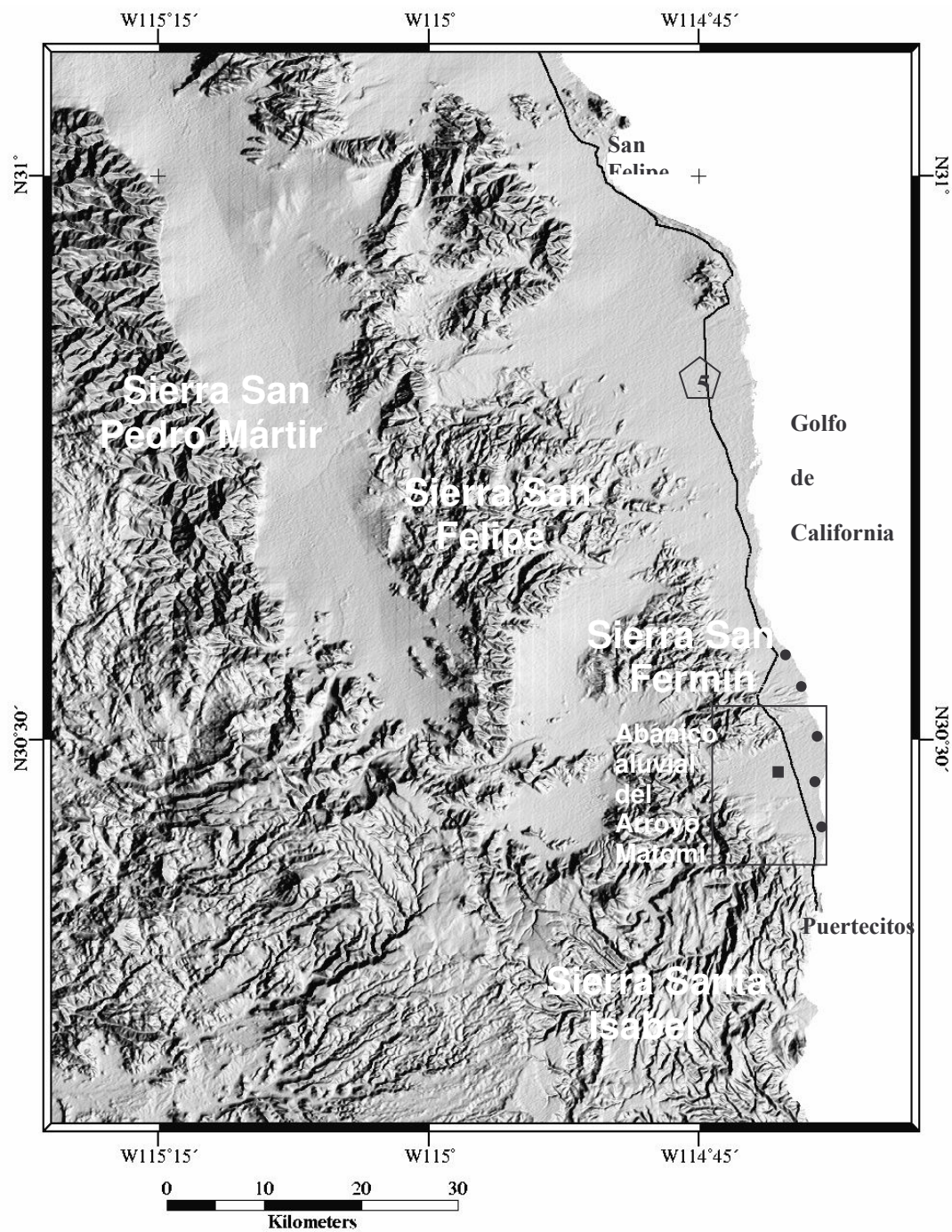


Figura 1. Localización del área de estudio. El abanico aluvial del Arroyo Matomí (AAAM) se denota con el rectángulo color negro, los puntos muestran los campos turísticos, el cuadro ubica el pozo y la línea negra muestra la carretera estatal número 5 que comunica San Felipe y Puertecitos.

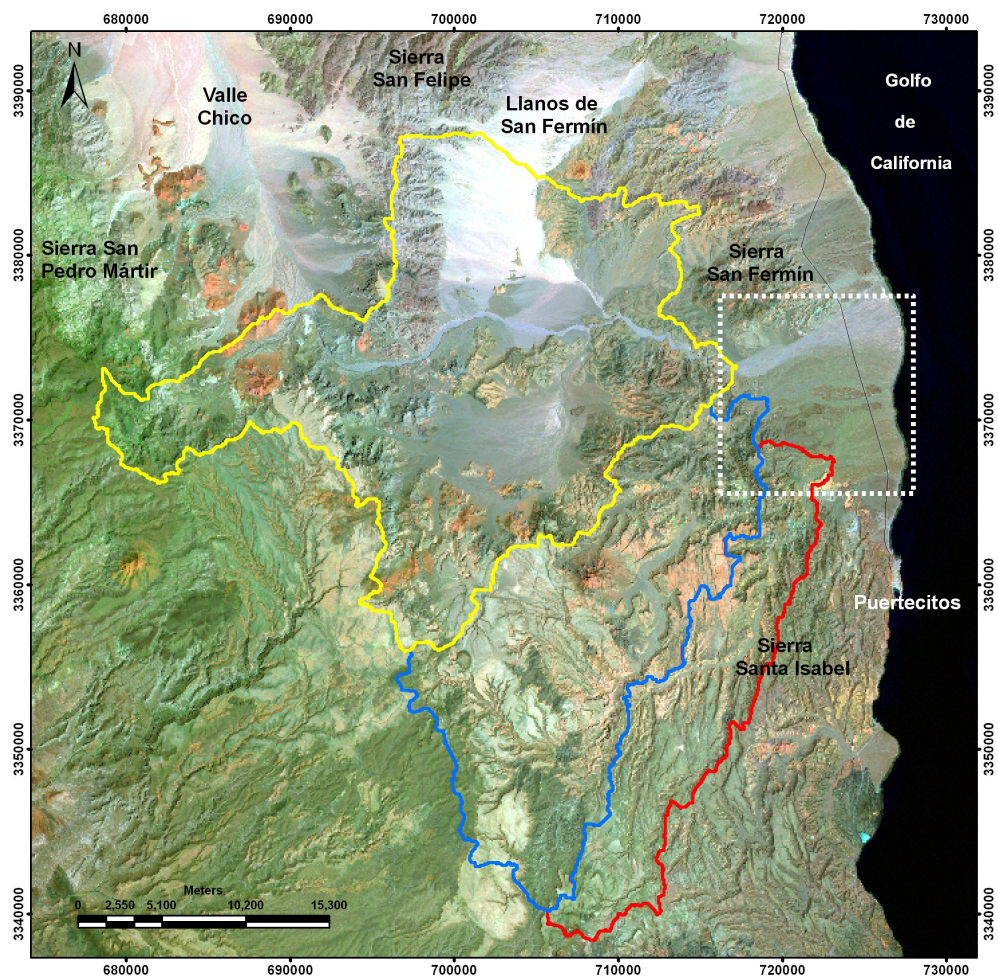


Figura 2. Imagen Landsat TM 2004, RVA 7-4-2. El rectángulo punteado representa el AAAM. La línea amarilla muestra el área que comprende la cuenca del Arroyo Matomí, la línea azul denota la cuenca del arroyo El Canelo, la línea color rojo muestra la cuenca del arroyo La Cantera y por último la línea negra muestra la carretera estatal número 5.

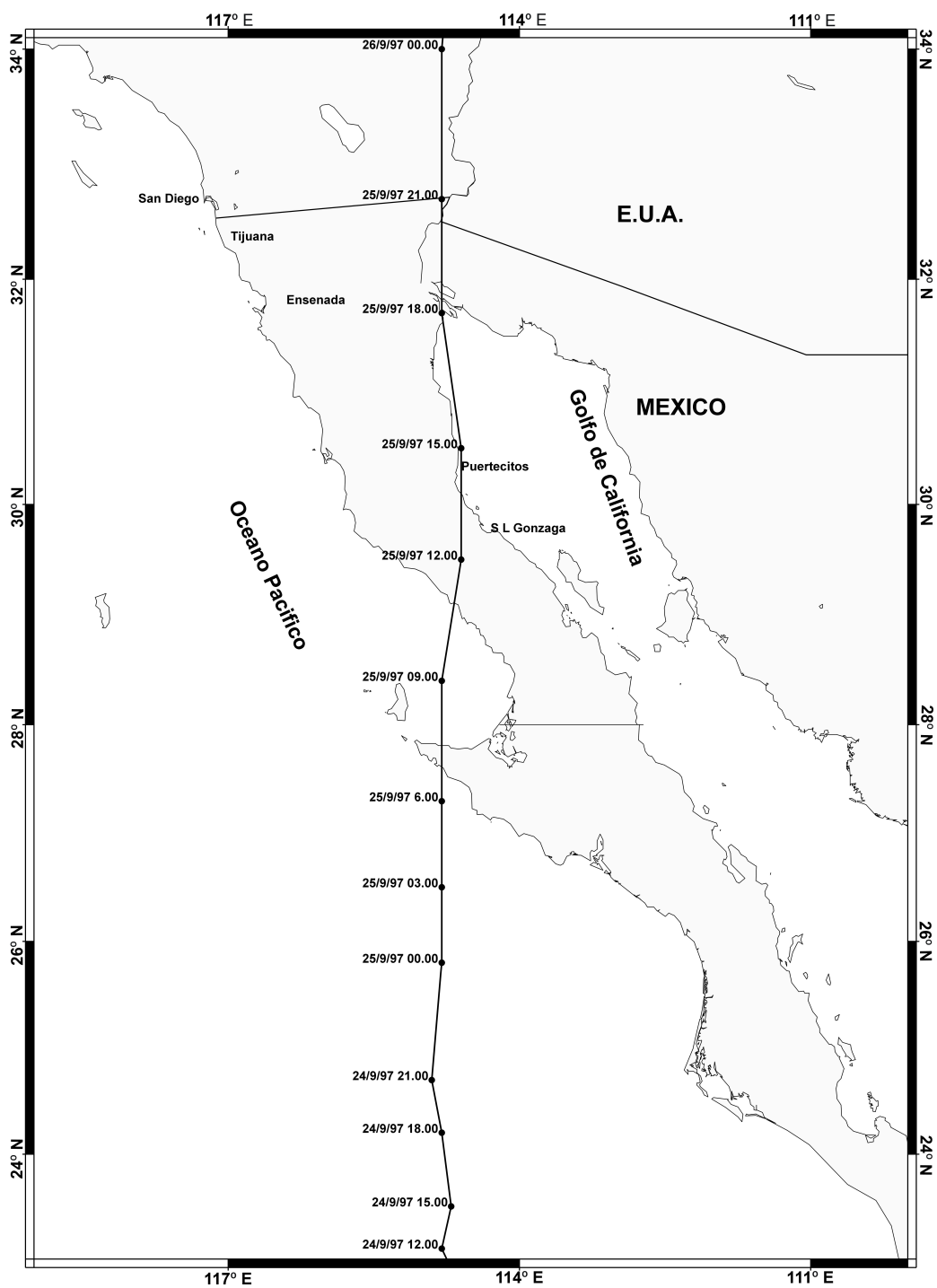


Figura 3. Trayectoria del Huracán Nora (HN) al cruzar la península de Baja California en Septiembre de 1997. La línea negra indica el trayecto del huracán cada 3 hrs (tiempo GMT).

I.1. Objetivos.

El objetivo general de esta tesis es realizar un análisis litológico y geomorfológico en el AAAM a partir de imágenes hiperespectrales (50 bandas) de alta resolución espacial (5m) y los efectos del HN sobre el abanico aluvial.

Para cubrir lo anterior se realizarán los siguientes objetivos específicos:

- Valorar los efectos del HN en el AAAM a través de un análisis multitemporal, utilizando imágenes Landsat de antes y después del HN.
- Evaluar las zonas de riesgo a inundación en el AAAM por el paso de huracanes y tormentas en la región, información útil para la planeación en la zona costera.
- Extraer la firma o perfil espectral en imágenes del sensor MASTER y asociarlos con los índices de contenido de roca medidos en campo.
- Combinar técnicas de percepción remota y SIG (Sistemas de Información Geográfica) apoyados de herramientas modernas de cómputo para el estudio geomorfológico.

I.2. Marco geográfico y geológico.

I.2.1. Geología del área.

El escenario geológico del área de estudio es la Provincia Volcánica de Puertecitos (PVP), que comprende rocas volcanoclásticas, principalmente tobas soldadas a no soldadas y brechas andesíticas y dacíticas del Mioceno Superior y Plioceno; con sedimentos marinos y no marinos intercalados y depósitos aluviales del Cuaternario (Noyola-Medrano, 1999). Estructuralmente la zona se encuentra afectada por fallas normales de gran ángulo con orientación N-NW a N-NE que forman parte del sistema de fallas del escarpe principal del golfo (Dokka y Merriam, 1982). La mayoría de las fallas cortan a las rocas Cenozoicas y Mesozoicas que incluyen a las secuencias prebatolíticas, al batolito y a la secuencia volcánica. Los depósitos sedimentarios del Plio-Cuaternario y los depósitos de abanicos aluviales modernos también están cortados por fallas normales que presentan evidencias de deformación reciente (Stock, 1989; Stock *et al.*, 1991; Martín-Barajas *et al.*, 1993; Martín-Barajas *et al.*, 1995; Lewis, 1996).

I.2.2. Fisiografía

La zona de estudio comprende un área de 92 km² entre los paralelos 30° y 30° 40' latitud norte y los meridianos 114° 30' y 115° longitud oeste, en la franja costera del golfo en el estado de Baja California, dentro del municipio de Ensenada (ver figura 1).

El poblado más cercano a la zona de estudio es Puertecitos, ubicado 4 km al sur del límite sur del abanico aluvial del AM (figura 2). El acceso es a través de la carretera estatal 5 que parte de Mexicali, pasa por San Felipe y continúa a Puertecitos en donde termina la carretera pavimentada.

La zona de estudio tiene una fisiografía de lomeríos, llanuras y sierras con topografía pronunciada. Las sierras aledañas al área son: Sierra San Fermín, Sierra Santa Isabel, San Pedro Mártir y San Felipe (figura 2).

I.2.3. Cuenca hidrológica.

El AAAM se encuentra dentro de la región hidrológica No.4 cuenca A (Figura 4). Localmente, al abanico aluvial drenan tres cuencas hidrológicas: Matomí, El Canelo y La Cantera (Figura 5) (Para más detalles consultar el Capítulo III).

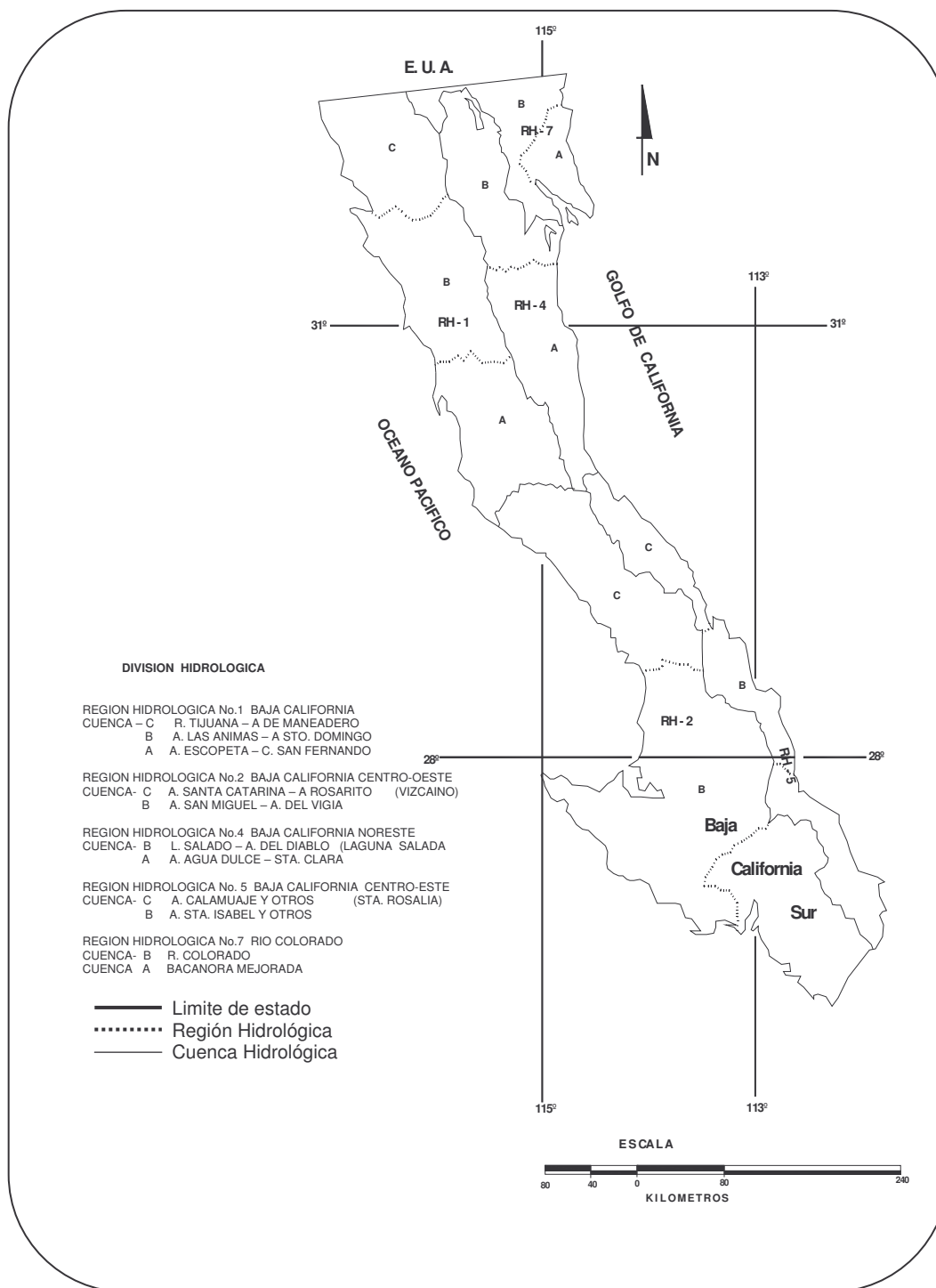


Figura 4. Cuencas Hidrológicas del Estado de Baja California según INEGI 1995.

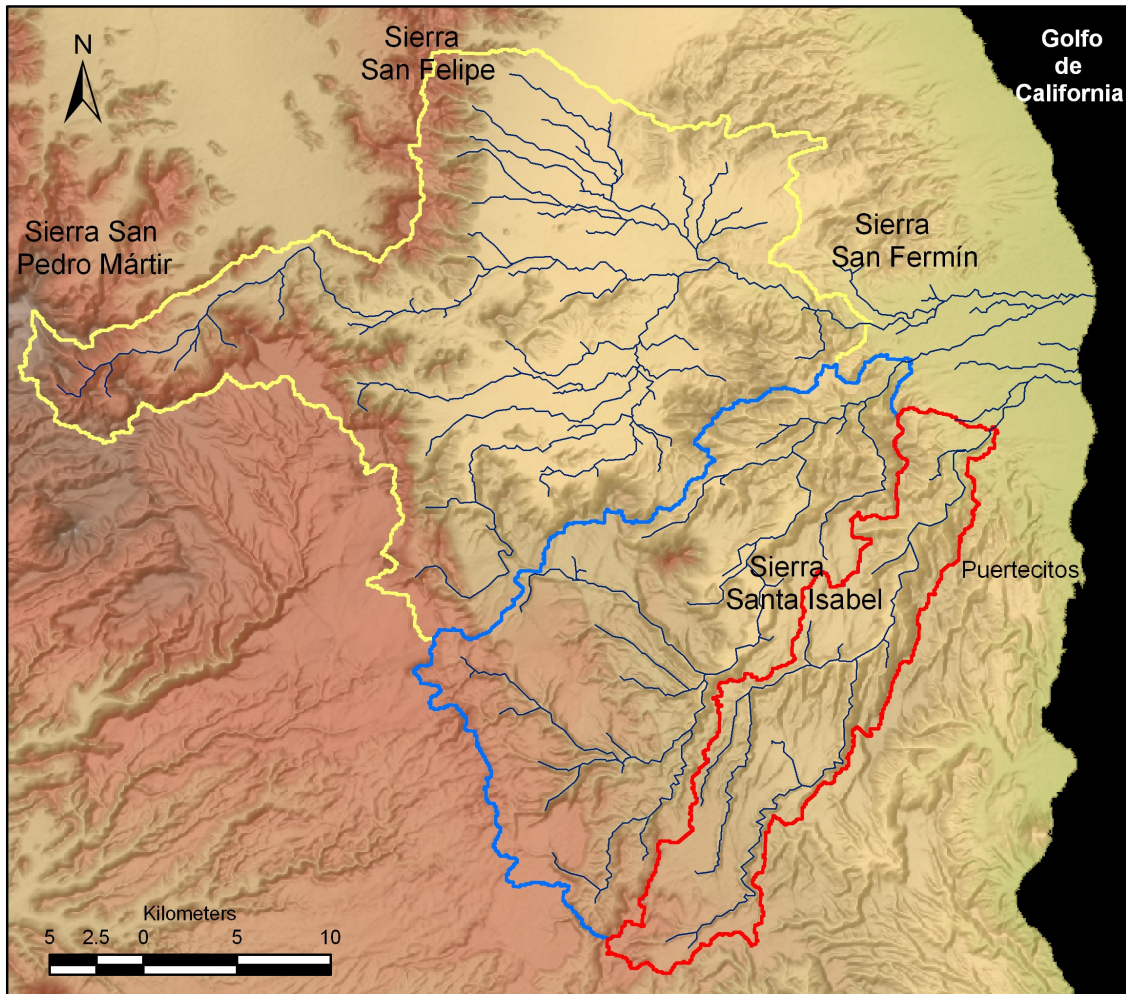


Figura 5. Modelo digital de elevación, con las cuencas hidrológicas que drenan hacia el abanico aluvial del arroyo Matomí (AAAM). La línea amarilla delinea la frontera de la cuenca del arroyo Matomí (AM), la línea azul la cuenca del arroyo El Canelo (AEC) y por último la línea roja delimita la cuenca del arroyo La Cantera (ALC). En azul-gris claro denota la red de hidrología superficial.

I.3 Generalidades de los depósitos aluviales.

I.3.1 Abanicos aluviales.

Los abanicos aluviales son cuerpos sedimentarios de aspecto triangular o de abanico con pendiente suaves de 2 a 10°, y se encuentran típicamente en la base de cadenas montañosas (FEMA, 1989).

Las tormentas de lluvia en climas áridos y semiáridos, en combinación con cambios abruptos en la topografía crean las condiciones para la formación de abanicos aluviales. Estos ofrecen interesantes alternativas para desarrollo inmobiliario debido a las vistas panorámicas y al buen drenaje local, sin embargo éstos pueden estar sujetos a riesgos severos de inundación.

Según la Agencia Federal de Administración de Emergencias de los Estados Unidos (FEMA) los abanicos aluviales se construyen en el tiempo geológico a través de una secuencia general que incluye:

1. Roca y suelo son erosionados en las zonas montañosas de la cuenca
2. Estos sedimentos son transportados a través de canales de arroyos por flujos de tormenta. El flujo torrencial confinado en los barrancos de las montañas emerge a un amplio valle con pendiente suave y progresivamente pierde velocidad mientras deposita sedimentos al cruzar hacia las partes bajas del valle. La salida del cañón forma el ápice del abanico que representa el punto más alto del abanico.

3. El flujo que sale del ápice es a través de un canal de alta velocidad. Este canal seguirá ya sea una trayectoria nueva o una preexistente excavada por tormentas anteriores posiblemente ahondando el canal en un proceso de erosión. El riesgo en los canales de la parte proximal del abanico puede ser alto debido a velocidad del flujo, debido a la presencia de desechos de la cuenca y la trayectoria impredecible de los flujos.
4. El flujo del canal principal al encontrar una zona más plana en la parte media del abanico se ensancha y se hace más somero, perdiendo velocidad y depositando el sedimento y escombros. El material depositado puede rellenar los cauces de canales antiguos que previamente fueron erosionados, provocando un desarrollo abrupto de canales nuevos. El proceso de erosión/depositación incluye el drenaje trezado de canales donde los flujos individuales se dividen y se vuelven a unir al erosionarse y rellenarse alternadamente. Este proceso de drenaje trezado ocurre erráticamente creando patrones de flujos aleatorios e impredecibles.
5. En la base del abanico, la velocidad del agua disminuye al fluir sobre una superficie más uniforme con poca pendiente induciendo la infiltración en el suelo. En la base del abanico es común el flujo laminar, no obstante, la velocidad de flujo puede ser alta. Y en los abanicos adyacentes que se forman a lo largo de cadenas montañosas tienden a converger cerca de sus bases.

I.3.2 Barniz del Desierto.

El barniz del desierto (figura 6 (a) y (b)) es un rasgo superficial de los clastos que permite definir la edad relativa de los depósitos aluviales. Es un proceso biogeoquímico que produce una capa delgada de color oscuro (café a negro) que se desarrolla naturalmente en la superficie expuesta de las rocas del desierto y de zonas áridas del mundo. Según Dorn y Oberlander (1981) el barniz del desierto es formado por colonias de bacterias microscópicas que viven en la superficie de la roca por miles de años. Las bacterias absorben elementos traza de manganeso y hierro de la atmósfera y los precipitan formando una capa oscura de óxidos de manganeso, o rojiza de óxidos de hierro, en la superficie de la roca. Esta capa delgada también incluye partículas cementadas de arcilla que ayudan a proteger a las bacterias contra la desecación, temperaturas extremas y radiación solar intensa. De acuerdo a Dorn et al 1982, se requieren quizás unos 10,000 años para formar una capa completa. El fechado del barniz se ha vuelto de gran importancia para estudios geomorfológicos y antropológicos ya que al igual que las rocas, los artefactos líticos y grabados hechos por el hombre también desarrollan barniz del desierto.



Figura 6 (a).Este sitio se ubica sobre el ALC, a un lado del camino que comunica San Felipe de Puertecitos. En la figura se muestra la diferencia entre los clastos que desarrollaron barniz del desierto en su superficie expuesta (lado izquierdo) y los clastos que fueron removidos por maquinaria (trascabo) del sitio y no presentan barniz (lado derecho).



Figura 6 (b). En esta fotografía se aprecia un flanco de la roca que desarrollo barniz del desierto. Sobre esta se tallaron petroglifos que exponen el color claro de la roca fresca. El petroglifo “Cartabón”, se relaciona al rancho contiguo a la zona, cerca del Rosario, B. C. Fotografía tomada por: Alfonso Carnoda.

La modificación en la posición de las rocas sobre las zonas activas de los abanicos por el arrastre de la corriente afecta el proceso de formación de barniz del desierto, alterando la respuesta que registran los sensores remotos. Esta propiedad en los abanicos activos es una componente útil para estimar la extensión de los efectos del HN en su paso por el AAAM en Septiembre de 1997.

I.4. Aspectos generales de los sensores remotos.

I.4.1 Sensor LANDSAT 5 TM y sensor LANDSAT 7 ETM

El satélite Landsat 5 TM fue puesto en órbita el 1° de marzo de 1984 portando el sensor TM (Mapeador Temático) con captura de datos en 7 bandas diferentes. Estas bandas fueron elegidas especialmente para el monitoreo de vegetación a excepción de la banda 7 que se agregó para aplicaciones geológicas. Su órbita, sincrónica con el sol, tiene una altura de 705 Km y un período de 98.9 minutos, dando 14 vueltas diarias alrededor de la Tierra. Por ser heliosincrónica pasa por una determinada longitud siempre a la misma hora, las 9:45 am (hora local) (Boston Geomatica, 1995).

El sensor Landsat 7 ETM fue lanzado el 15 Abril de 1999, con un nuevo sensor a bordo llamado ETM+ (mapeador temático mejorado). Este sensor cuenta con 8 bandas, de las cuales 7 son iguales a las del sensor TM, pero la mejora técnica principal de este sensor es la adición de una banda espectral (Banda pancromática 8) con mayor resolución espacial (15 m).

Los sensores Landsat TM y ETM cuentan con los subsistemas que registran datos simultáneos de las regiones del espectro correspondiente al visible e infrarojo cercano (VNIR), infrarojo medio o de onda corta (SWIR), infrarojo termal (TIR) y pancromática (PAN).

A continuación se muestran las características de las ventanas espectrales de los sensores Landsat TM y ETM. (Figura 7):

- **VNIR:** registra 4 bandas en el intervalo espectral de 0.45 a 0.90 μm con una resolución espacial de 30 metros.
- **SWIR:** registra 2 bandas en el intervalo espectral de 1.55 a 2.35 μm con una resolución espacial de 30 metros.
- **TIR:** registra 1 banda en el intervalo espectral de 10.40 a 12.50 μm con una resolución espacial de 60 metros.
- **PAN:** banda 8 (sensor Landsat ETM) en el intervalo espectral de 0.52 a 0.9 μm con una resolución espacial de 15 metros.

I.4.2 Sensor ASTER.

Japón desarrolló el proyecto del sensor Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER), con el fin de obtener datos geológicos más detallados y estudiar fenómenos de impacto ambiental a nivel global, por ejemplo la actividad volcánica. ASTER es un sensor satelital de imágenes de alta resolución, transportado por el satélite TERRA, y fue puesto en órbita el 18 de Diciembre de 1999 (Engesat, 2000).

Las características de las ventanas espectrales del sensor ASTER en sus 14 bandas son:

- **VNIR:** tiene 3 bandas en el intervalo espectral de $0.52 - 0.86 \mu\text{m}$ con una resolución espacial de 15 metros.
- **SWIR:** registra en 6 bandas en el intervalo espectral de $1.60 - 2.43 \mu\text{m}$ con una resolución espacial de 30 metros.
- **TIR:** tiene 5 bandas en el intervalo espectral de $8.125 - 11.65 \mu\text{m}$ con una resolución de 90 metros

La figura 7 muestra las ventanas espectrales del sensor ASTER y las firmas espectrales de algunos materiales.

I.4.3 Sensor MODIS.

El sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) es un instrumento a bordo del satélite Terra (EOS AM) y Aqua (EOS PM). El satélite Terra fue lanzado el 18 de Diciembre de 1999 y el Aqua el 4 de Mayo del 2003. Este instrumento es uno de los sistemas de observación de la Tierra con que cuenta la NASA. La orbita polar del Terra va alrededor de la Tierra y pasa de Norte a Sur a través del ecuador por la mañana, mientras que el Aqua pasa de Sur a Norte sobre el ecuador en la tarde. Terra MODIS y Aqua MODIS monitorean la superficie de la Tierra adquiriendo datos en 36 bandas espectrales (figura 7). Estos datos mejoran la comprensión de la dinámica global y de los procesos que ocurren en la Tierra, océanos y en la atmósfera inferior (Engesat, 2000).

Las características de las ventanas espectrales del sensor MODIS son:

- **VNIR:** 2 bandas en el intervalo espectral de 0.62 – 0.88 μm con una resolución espacial de 250 metros. 4 bandas en el intervalo espectral de 0.46 - 1.65 μm con una resolución espacial de 500 metros. 12 bandas en el intervalo espectral de 0.41 – 1.4 μm con una resolución espacial de 1000 metros.
- **SWIR:** 1 banda en el intervalo espectral de 2.02 – 2.1 μm y con una resolución espacial de 500 metros. 6 bandas en el intervalo de 3.7 – 4.6 μm con una resolución espacial de 1000 metros.
- **TIR:** 11 bandas en el intervalo espectral de 6.5 – 14.38 μm con una resolución espacial de 1000 metros.

I.4.4 Sensor MASTER.

El sensor aerotransportado MASTER es un simulador de los sensores satelitales ASTER y MODIS y fue desarrollado como apoyo de estos proyectos (Barnes et., 1998; Salomonson et al., 1989; Yamaguchi et al., 1998). MASTER es un instrumento para obtención de imágenes aéreas con ventanas espectrales similares a las de los sensores MODIS y ASTER. Los datos MASTER tienen un campo visual instantáneo de 2.5 miliradianes y un campo visual total de 85.92 grados (Hook et al., 2001).

El sensor MASTER cuenta con 50 bandas espectrales (figura 7) y las especificaciones de las ventanas espectrales se indican en la Tabla 1 del anexo B. Estas bandas están divididas en los siguientes grupos (Dmochwski, 2005):

- **VNIR:** 11 bandas en el intervalo espectral de 0.46 - 0.945 μm con una resolución espacial de 5 metros.
- **SWIR:** 14 bandas en el intervalo espectral de 1.625 – 2.3945 μm con una resolución espacial de 5 metros..
- **MID:** 15 bandas en el intervalo espectral de 3.15 – 5.25 μm con una resolución espacial de 5 metros.
- **TIR:** 10 bandas en el intervalo espectral de 7.9 – 12.75 μm con una resolución espacial de 5 metros.

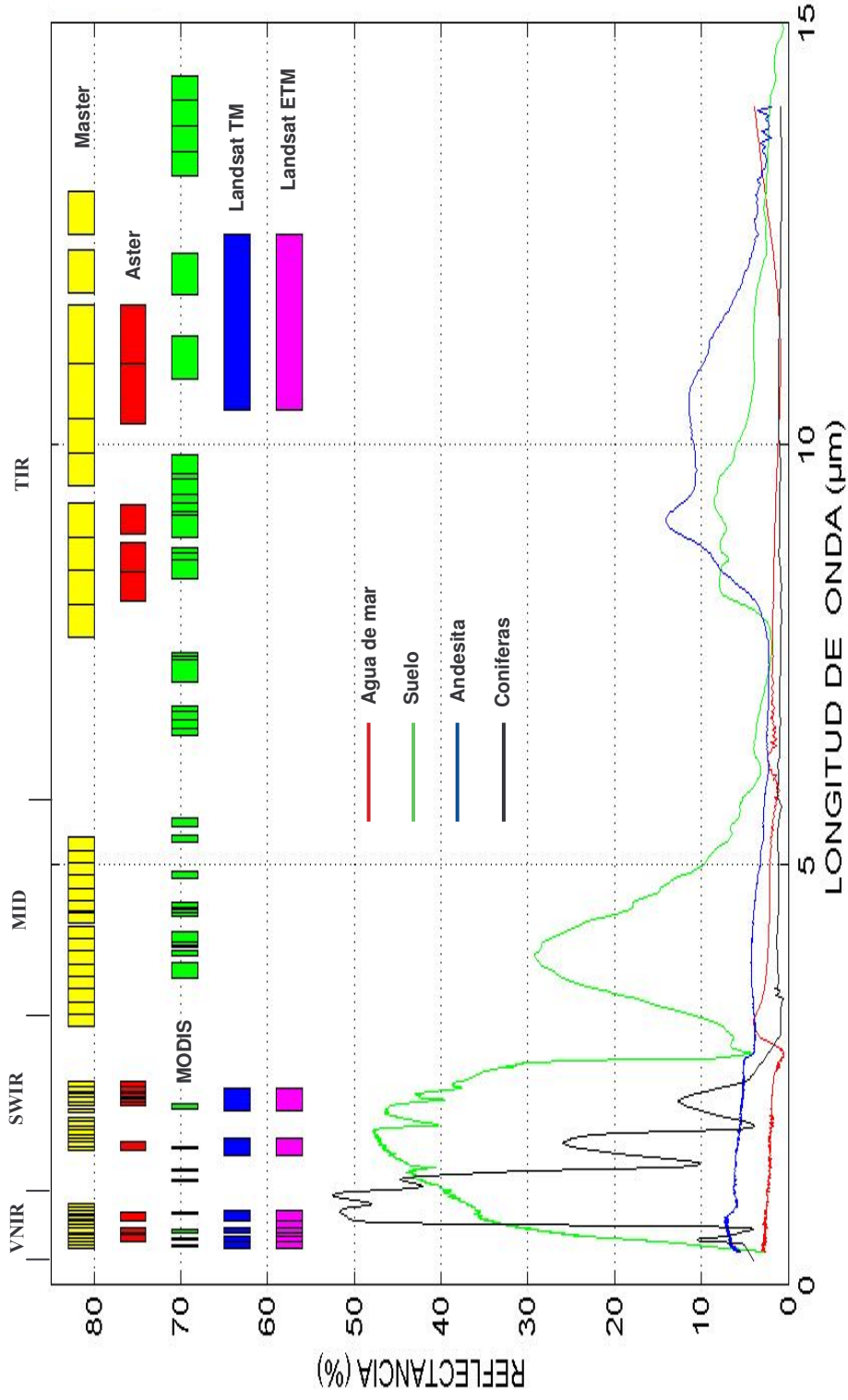


Figura 7. Ventanas espectrales de los sensores MASTER, ASTER, MODIS, LANDSAT TM y ETM y firmas espectrales de: agua de mar, suelo, andesita y bosque de coniferas (NASA, 1999). Ventanas espectrales: VNIR: Visible e infrarrojo cercano, SWIR: Infrarrojo de onda corta, MID: infrarrojo intermedio y TIR: infrarrojo térmico.

1.5. Materiales y métodos.

Los métodos utilizados para este trabajo se muestran en la Figura 9 y los materiales que se utilizaron para generar este trabajo en gabinete son:

- Imágenes hiperespectrales del sensor aerotransportado MASTER.
- Imágenes multiespectrales satelitales de la zona: Landsat TM, ETM y Aster (Tabla I).

Tabla I. Imágenes satelitales utilizadas.

Sensor	Fecha
TM	20/07/1987
TM	01/04/1988
ETM	13/04/2001
ASTER	18/04/2000

- Herramientas de computo: ERMAPPER v6.4, ENVI v3.6, ArcView 3.2, AUTOCAD 2000, CorelDraw 9.0, ArcGIS 9, MathLab 6.5.
- Equipo de cómputo para realizar el procesamiento de datos.
- Impresora y graficador (plotter) para la impresión de los resultados.

Los materiales que se utilizaron en campo son los siguientes:

- Cartas geológicas y topográficas H11B77 y H11B67 de CETENAL, escala 1:50,000.
- Cinta métrica (500 m), brújula, GPS.
- Bolsas de plástico para muestras de rocas

Las imágenes hiperespectrales MASTER se obtuvieron de cuatro vuelos (figura 8). a lo largo de la PVP (Hinojosa-Corona, 2001).

- Vuelo: 99-003-02. Día de vuelo: 29/04/99
- Vuelo: 99-003-04. Día de vuelo: 01/05/99
- Vuelo: 99-003-06. Día de vuelo: 04/05/99
- Vuelo: 99-003-07. Día de vuelo: 05/05/99

La clave de cada línea fue asignada por la NASA; por ejemplo: 99-003-02, la primera cifra corresponde al año 1999 (99) en que se realizó el vuelo; la segunda (003) es un número de control que asigna la NASA y la tercera clave (02) corresponde al número progresivo en el que se realizó el vuelo sobre la zona (NASA, 1999). Para este trabajo se utilizaron los vuelos 99-003-02 y 99-003-04 (Tabla II).

Tabla II. Descripción de los vuelos con datos utilizados en este trabajo.

Vuelo	Línea	Imágenes
99-003-02	8	E F
	9	G H
	10	I J
	11	K
99-003-04	6	F
	7	D E

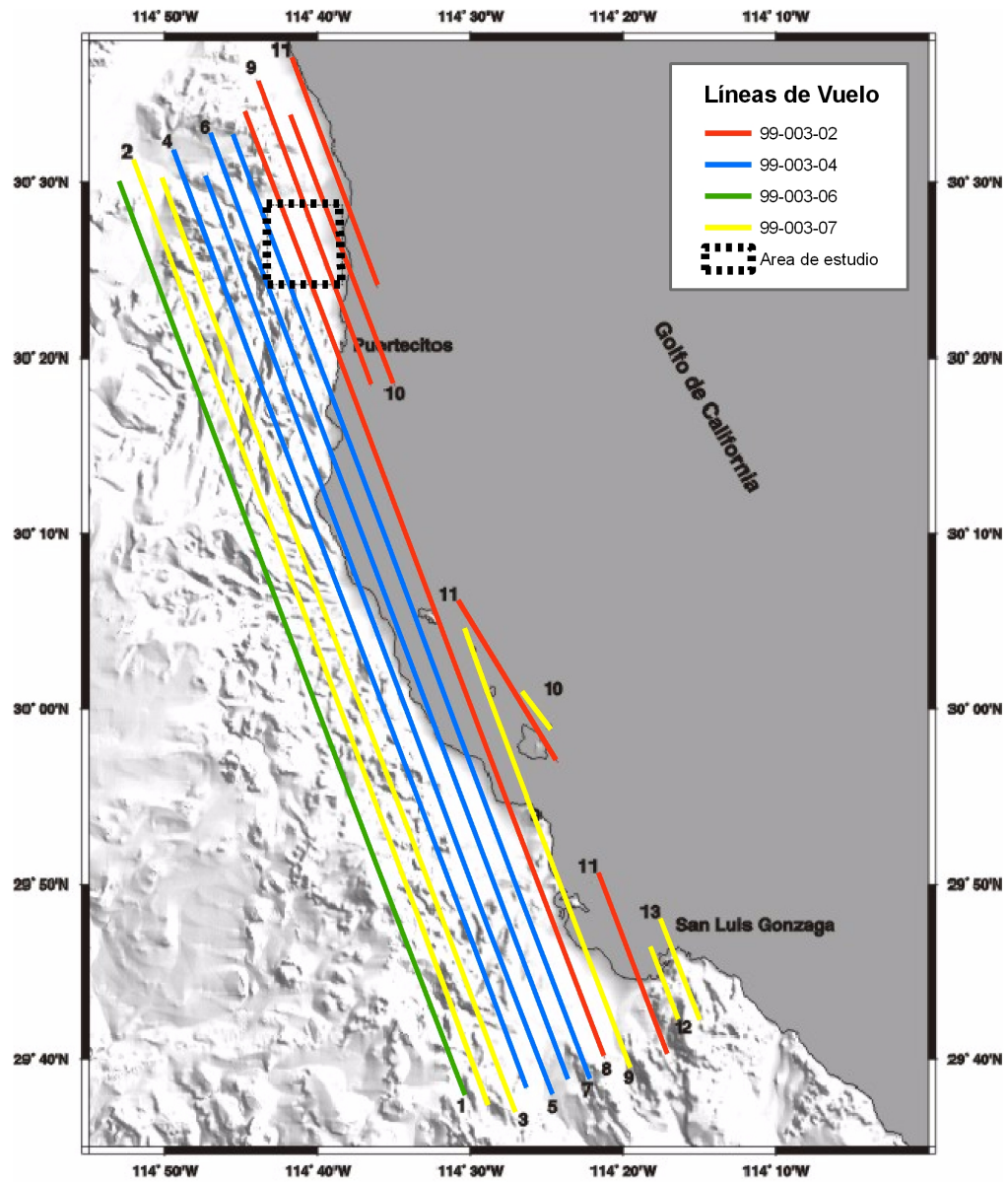


Figura 8. Levantamiento aéreo sobre la PVP. El área de estudio es el recuadro ubicado al norte de Puertecitos.

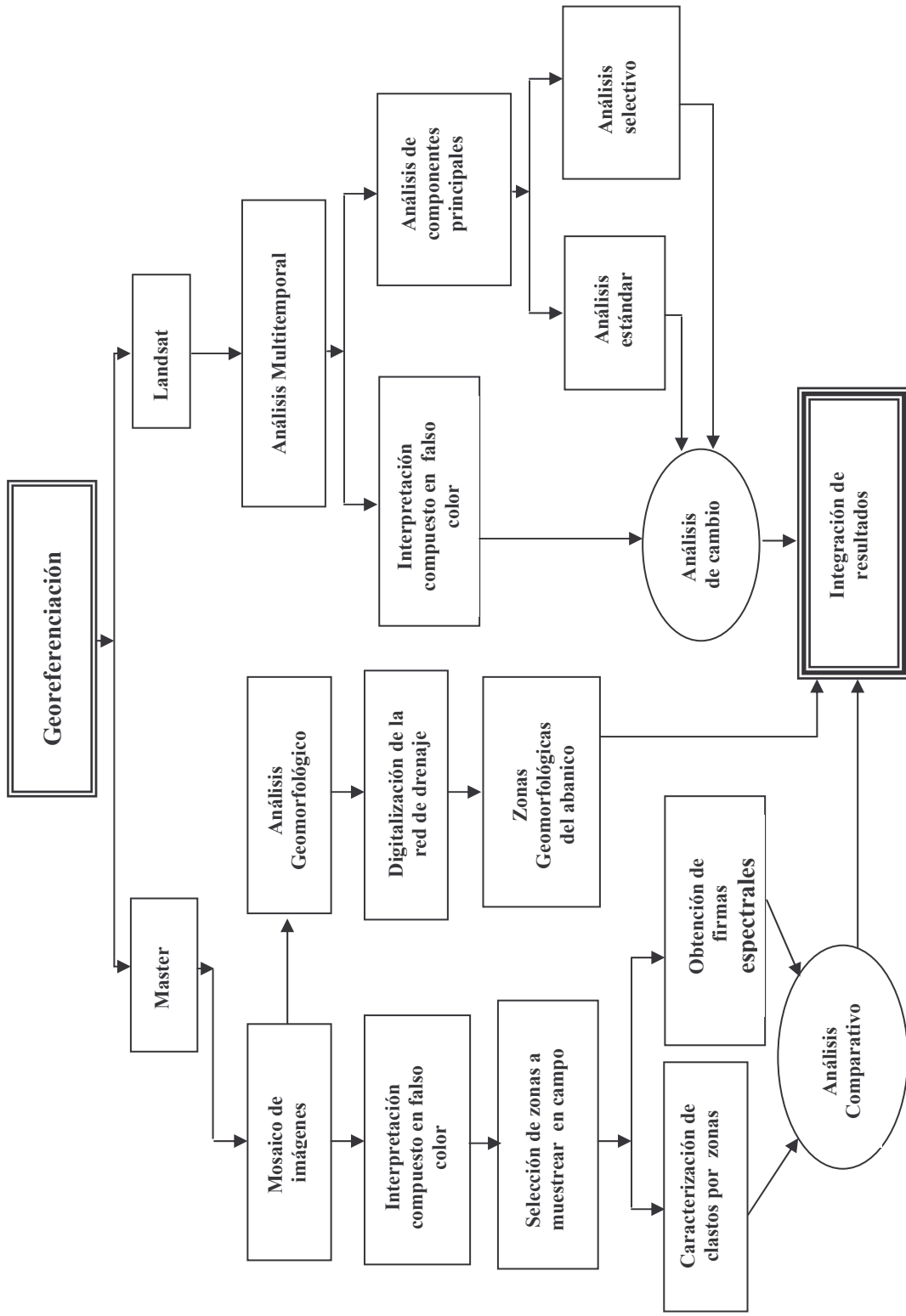


Figura 9. Esquema utilizado para mostrar la metodología a seguir en este trabajo.

II. METODOS.

II.1. Pre-procesamiento.

Las imágenes MASTER primeramente requieren un pre-procesamiento debido a que son datos crudos y no poseen ningún tratamiento digital.

II.1.1. Georreferencia de imágenes MASTER.

Para facilitar la localización geográfica de elementos de interés dentro de una imagen, es necesario aplicarle una corrección geométrica de tal manera que sus columnas y renglones se orienten a un sistema de referencia. Este puede estar definido en términos de una proyección cartográfica específica de mapas topográficos, geológicos u otras imágenes de satélite.

A este proceso se le conoce como georreferencia y consiste en reconocer rasgos de la imagen cuyas posiciones son conocidas y llamándose a estos sitios “puntos de control en el terreno” (Richards, 1993; Campbell, 1996; Sabins, 1997; Vincent, 1996).

Posteriormente se definen dos sistemas de coordenadas cartesianos (figura 10), se describe la ubicación de los puntos en el mapa (x, y) o referencia y el otro define la localización de los píxeles correspondientes (u, v) dentro de la imagen. Estos sistemas de coordenadas se pueden relacionar mediante un par de funciones de mapeo f y g en la ecuación 1:

$$u = f(x, y) \quad y \quad v = g(x, y) \quad (1)$$

Las formas explícitas para estas funciones de mapeo generalmente no se conocen por lo que se eligen como polinomios de primero, segundo o tercer grado (Richards, 1993). Por ejemplo, para el caso del segundo orden, las funciones se muestran en la ecuación 2 y 3:

$$u = a_0 + a_1x + a_2y + a_3xy + a_4x^2 + a_5y^2 \quad (2)$$

$$v = b_0 + b_1x + b_2y + b_3xy + b_4x^2 + b_5y^2 \quad (3)$$

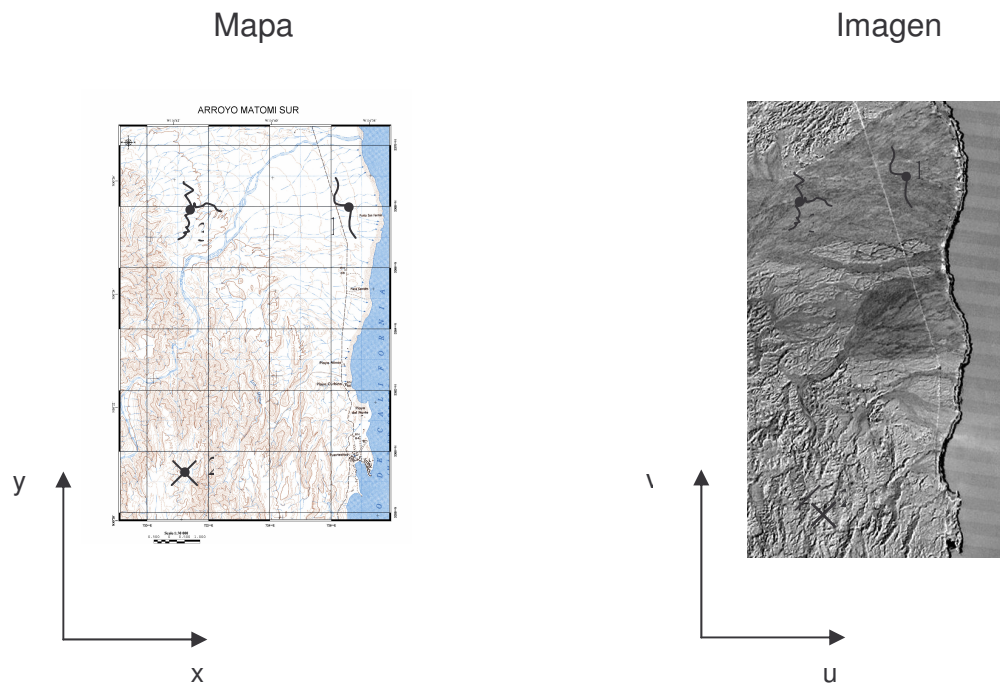


Figura 10. Determinación de puntos de control en sistema de coordenadas definidos para el mapa y la imagen que va ser georeferida.

Nótese que el número mínimo de puntos de control requerido para una aproximación polinomial de primer grado es de tres puntos, mientras que se necesitan seis y diez puntos para los polinomios de segundo y tercer grado, respectivamente.

Sin embargo, es recomendable utilizar suficientes puntos de control de tal manera que si algunos puntos contienen errores de posición, éstos no tendrán una influencia notoria sobre los coeficientes polinomiales (Richards, 1993; Sabins, 1997; Campbell, 1996).

Después de terminar el mapeo polinomial, se realiza una versión de la imagen corregida geoméricamente. Para este proceso se crea una retícula donde cada nodo representa el centro del píxel en la imagen corregida.

El espaciamiento en la malla se elige de acuerdo al tamaño del píxel que se requiere en la imagen corregida. Los centros de los píxeles en las mallas no corresponden exactamente con los centros de píxeles en la imagen original (figura 11).

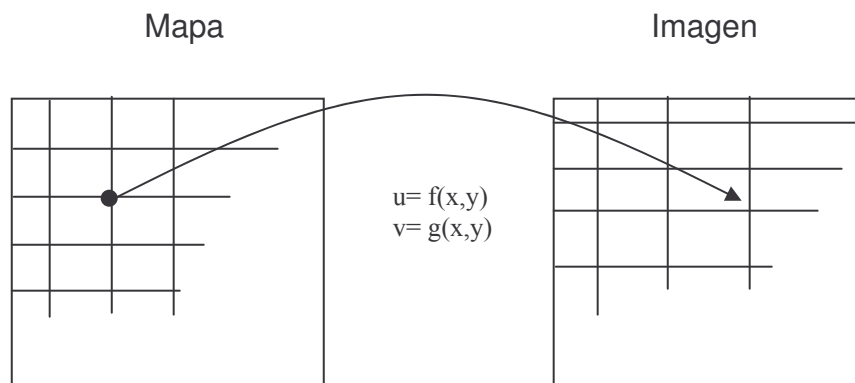


Figura 11. Empleo de polinomios para la ubicación del centro de los píxeles dentro de una malla previamente definida sobre el mapa (Richards, 1986).

Para arreglar el problema en el que los centros de píxeles no corresponden, se utilizan técnicas de interpolación para obtener el valor de brillo correspondiente de cada punto en la imagen corregida. Existen tres técnicas para el remuestreo: a) asignación del vecino más cercano, b) interpolación bilineal y c) convolución cúbica (Richards, 1993; Campbell, 1996).

El método de interpolación (convolución cúbica) de datos raster, toma 16 valores de los píxeles mas cercano al punto a interpolar y traza una curva suavizada entre ellos para determinar cual punto de esta curva es el mas adecuado para la extracción del valor interpolado. El método de convolución cúbica requiere más tiempo de proceso que otros métodos, pero tiene la ventaja de ser el método que da resultados mas suavizados en sus salidas.

Para la georeferenciación de las imágenes MASTER se utilizó la convolución cúbica como técnica de remuestreo y los puntos de control se obtuvieron a partir de una imagen ASTER del año 2000 (Tabla I, Capítulo I). Se seleccionaron 10 puntos de control dispersos sobre cada imagen del vuelo de MASTER definidas en la Tabla II (Capítulo I), procurando cubrir toda su extensión. Esto se realizó mediante la identificación de rasgos terrestres sobresalientes tales como: intersecciones de caminos, sierras, geoformas destacadas, línea de costa de fácil reconocimiento, etc.

La proyección cartográfica utilizada como marco de referencia fue la Universal Transversa de Mercator (UTM) zona 11. Todas las imágenes fueron sometidas a este contexto cartográfico.

II.2. Procesamiento.

II.2.1. Composición de falso color.

Las imágenes digitales se pueden desplegar de varias formas. Una de ellas utiliza la técnica de color indexado, donde el valor del píxel es el índice a una tabla de color. En el caso del despliegue en tonos de grises, hacer uso de una tabla que contiene tonos de grises, al color negro le corresponde el índice con valor 0 y al blanco el valor máximo, que toma el valor de 255 para imágenes de 8 bits.

Otra forma de desplegar imágenes es en falso color, donde se seleccionan bandas espectrales a las cuales se les asigna uno de los colores primarios (rojo, verde y azul). Cuando existen más de tres canales espectrales, entonces se pueden realizar una serie de combinaciones de los colores primarios que permiten desplegar compuestos con colores sintéticos. Esta técnica es bastante útil y comúnmente utilizada para la interpretación geológica a partir de una imagen de satélite (Richards, 1993; Sultan et al, 1987; Rivard et al, 1992; Chávez, 1989; Hernández-Alvarez, 1995; Ribeiro de Almeida et al., 1995, Jansma et al, 1996; Vincent, 1997; Sabins,1997).

En imágenes de satélite con más de tres canales espectrales, como es el caso de los sensores utilizados en este trabajo: sensor MASTER, TM, ETM, ASTER y MODIS, se pueden realizar combinaciones asignando los diferentes canales a los colores primarios rojo, verde y azul (R - V - A), generando imágenes en color natural y en falso color. Las

ternas que se pueden establecer es un problema de teoría combinatoria (Baldor, 1966). El número de combinaciones C que se pueden formar a partir de m elementos, tomados en grupos de n en n , de modo que dos grupos que tengan el mismo número de elementos se diferencien en al menos un elemento. Este número de combinaciones está dado por la ecuación 4:

$$C = \frac{m(m-1)(m-2)\dots(m-n+1)}{n(n-1)(n-2)\dots 1} = \frac{m(m-1)(m-2)\dots((m-n)+1)}{n!} \quad (4)$$

Donde el denominador es conocido como “n factorial” y simbolizado como $n!$ (Noyola-Medrano et al., 2005). En el caso del sensor Landsat TM, $m = 7$ bandas espectrales del sensor TM, $n = 3$ elementos por terna para la asignación de los colores primarios, entonces tenemos que el número de combinaciones C de ternas distintas está dado en la ecuación 5:

$$C = \frac{7 \times 6 \times 5}{3 \times 2 \times 1} = 35 \quad (5)$$

Esto nos arroja un total de 210 configuraciones distintas para el sensor TM (35 ternas por 6 permutaciones por terna). En la Tabla III se muestran los sensores mencionados anteriormente con sus respectivas ternas y combinaciones.

Tabla III. Ternas y combinaciones de los sensores.

Sensor	Bandas	Ternas	Combinaciones
Master	50	19,600	117,600
Modis	34	7,140	42,840
Aster	14	364	2,184
ETM	8	56	336

II.2.2. Análisis de componentes principales.

La naturaleza multidimensional de las imágenes multiespectrales permite que estas puedan ser representadas como vectores en el espacio con un número de ejes o dimensiones iguales al número de componentes espectrales asociados a cada píxel.

El análisis de componentes principales (ACP) también conocido como la transformada de Karhunen-Loève (TKL) o de Hotelling, se basa en las propiedades estadísticas de su representación vectorial (Richards, 1993; González et al, 1987; Schowengerdt, 1997; Bischof, 1998).

La TKL es una herramienta importante para el procesamiento de imágenes y se utiliza para la extracción de características debido a que hace evidente de características que no son observadas en los datos originales, o bien, como herramienta de reducción de dimensionalidad, ya que hace posible percibir información esencial contenida en la imagen multiespectral en un menor número de dimensiones. La TKL es una

transformación en el espacio de rasgos o características diseñado para remover la redundancia multispectral (Ready et al, 1973). Permite al usuario generar una serie nueva de ejes rotados o componentes que son ortogonales entre sí y cada imagen nueva no tienen correlación espectral con respecto a las otras imágenes nuevas. La mayor proporción de la variabilidad de los datos está presente sobre el primer componente (CP1), disminuyendo esta variabilidad en los componentes siguientes. La suma de la variabilidad de todos los componentes es igual al total de la variabilidad presente en las imágenes originales.

El ACP hace uso de la media global m y de la varianza global \sum_x , esta última conocida como matriz de covarianza. La posición promedio de un píxel-vector en el espacio multispectral estará definida por el valor esperado del vector x , de acuerdo a la ecuación 10:

$$m = \varepsilon\{x\} = \frac{1}{K} \sum_{j=1}^K x_j \quad (10)$$

Donde m es la media global, ε es la operador del valor esperado y x_j es el jésimo píxel-vector de un total K .

Mientras el parámetro m define la posición esperada de un píxel en el espacio multispectral, la matriz de covarianza estimará el grado de dispersión de los píxeles alrededor de la media y está definida como por la ecuación 11:

$$\sum_x = \varepsilon\{(x - m)(x - m)'\} \quad (11)$$

en donde el superíndice (t) denota el vector transpuesto. Un estimador imparcial de la matriz de covarianza está dado por la ecuación 12:

$$\sum_x = \frac{1}{K-1} \sum_{j=1}^K (x_j - m)(x_j - m)^t \quad (12)$$

La matriz de covarianza es una matriz cuadrada y simétrica, con dimensión igual al número de bandas incorporadas en el análisis. Los elementos en la diagonal contienen la varianza en cada imagen y los fuera de la diagonal indican la varianza entre pares de bandas. Además de indicarnos la variabilidad de las imágenes de manera individual y entre ellas, \sum_x también nos informa si existe correlación entre las respuestas de las n bandas. Si las bandas están altamente correlacionadas los valores fuera de la diagonal principal de la matriz de covarianza son más grandes en comparación con los valores de la diagonal principal. Si por otro lado, las bandas tienen muy poca correlación los valores fuera de la diagonal serán muy cercanos a cero (Richards, 1993). Este comportamiento puede ser descrito en términos de la matriz de correlación ρ cuyos elementos están relacionados a la matriz de covarianza mediante la siguiente expresión, esta dada por la ecuación 13:

$$\rho_{ij} = v_{ij} / \sqrt{v_{ii}v_{jj}} \quad (13)$$

Donde ρ_{ij} es un elemento de la matriz de correlación y v_{ij} son elementos de la matriz de covarianza; v_{ii} y v_{jj} son las varianzas de los datos en las bandas 'i' y 'j'. En la matriz de correlación, los elementos de la diagonal son igual a uno y los demás nos

indican qué tanto se parecen o correlacionan pares de bandas. Entre más cercano el valor a uno, mayor será su semejanza y entre más cercano a cero indicará un mayor desigualdad. La TKL busca una rotación de ejes hacia un espacio, tal que los elementos fuera de la diagonal sean igual a cero, es decir con 0 correlación. Hay que buscar una transformación lineal G para los datos originales x que describan a los píxeles en el nuevo espacio y tal que

$$y = G x \quad (14)$$

La matriz de covarianza Σ_y de los píxeles en el nuevo espacio y estará definida en términos de la matriz de covarianza Σ_x de los vectores originales x , y de la matriz de transformación lineal G como lo indica la ecuación 15:

$$\Sigma_y = G \Sigma_x G^t \quad (15)$$

Como la matriz de covarianza Σ_y representa la variabilidad en un espacio con cero correlación, ésta debe ser diagonal. G puede ser reconocida como la matriz transpuesta de los vectores propios de Σ_x (eigenvectores) y los elementos en la diagonal de Σ_y como los valores propios de Σ_x (eigenvalores).

La matriz de covarianza Σ_y es cuadrada con dimensión igual al número de ejes o componentes donde los elementos de la diagonal representan la variabilidad en cada eje y estos son ordenados por magnitud, donde el primer elemento de la diagonal es el de mayor variabilidad y el último elemento es el de menor.

El ACP además de ser una herramienta útil para reducir la dimensionalidad en imágenes multiespectrales de acuerdo a su variabilidad, ésta puede ser utilizada para detección de cambios cuando se aplica en imágenes multitemporales. Existe literatura donde se explican los diferentes métodos de detección de cambios, desde libros (Chuvieco, 1996; Jensen, 1996) hasta aplicaciones específicas (Amelibia, 1999). Al igual que en el uso tradicional del ACP, su aplicación en la detección de cambios puede tener dos variantes: el método estándar y el selectivo. El estándar consiste en realizar las componentes principales (CP) de todas las bandas comunes en imágenes tomadas de un mismo sitio pero en diferentes tiempos, antes y después del fenómeno que se quiera analizar, eligiendo como componente de cambio aquella que muestre una alteración en el signo de los vectores propios asociados a cada banda. Lo usual es encontrar sólo un componente en el que ocurra esto, por lo que, en general, de este método sólo se obtiene una imagen de cambios.

La otra variante en la aplicación del ACP en la detección de cambios es el método selectivo, donde los componentes principales se calculan a pares de las mismas bandas en las dos fechas a comparar. La primera componente se alinea con el eje de mayor variabilidad presente en las dos fechas, presentando la información en común mientras que en la segunda estará registrando las diferencias entre ellas. Para representar en color los cambios, se pueden generar compuestos en falso color con las segundas componentes de los diferentes pares de bandas utilizados en el análisis.

II.2.3. Análisis litológico.

Para realizar el trabajo de campo, del mosaico de imágenes MASTER, se seleccionaron varios sitios de muestreo sobre cada arroyo (Matomí, El Canelo y la Cantera); estos presentaban contrastes notables en tonalidad y textura.

Posteriormente a cada sitio se le asignó una clave de letras y números, por ejemplo *M01*, la *M* corresponde al nombre del arroyo (arroyo Matomí) y *01* es el número que se le asignó al sitio. Las claves y coordenadas de todos los sitios (ver el Anexo B).

La metodología que se siguió en campo consistió en trazar un cuadrante de 5 X 5 m sobre cada sitio (figura 12), estas medidas se tomaron en base al tamaño de píxel (5 m de resolución espacial) de las imágenes MASTER. Sobre un vértice del cuadrante se tendió una cuerda hacia el vértice opuesto para disectar el cuadro (figura 13). Sobre la diagonal se realizó un conteo sistemático de los clastos con tamaño mayor a 2 cm y se describió cada uno de ellos anotando su composición, color expuesto, color en fractura, redondez, tamaño y características generales del sitio (pendiente, vegetación, desarrollo de barniz del desierto).

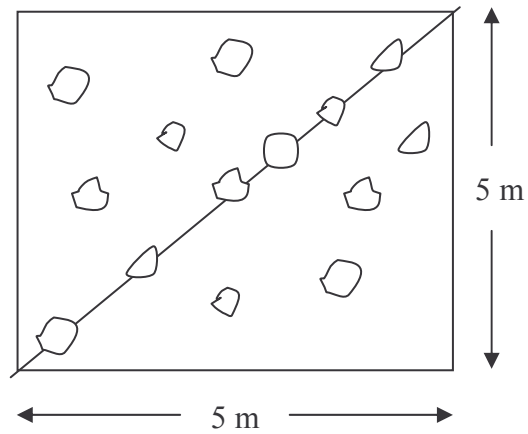


Figura 12. Sistema de muestreo realizado en campo.

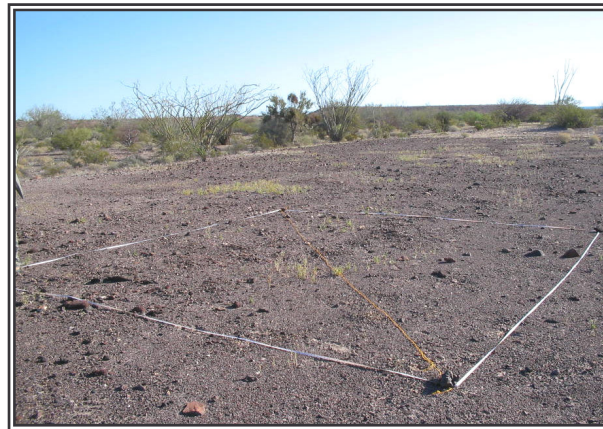


Figura 13. Fotografía del sitio M03 con el cuadrante montado sobre aluvión del abanico del AM.

Finalmente, para el conteo de clastos en cada sitio, se clasificaron los clastos en 5 grupos litológicos con base en las principales características texturales y mineralógicas de las rocas.

II.2.4. Firmas espectrales.

El término de firma espectral ha sido utilizado para referirse a la respuesta espectral de un rasgo sobre un rango de longitud de onda (Campbell, 1996). Cuando la radiación (energía) incide desde el espacio e interactúa con la superficie, parte de aquella es absorbida y la restante es reflejada. Todos los tipos de coberturas existentes sobre la superficie terrestre (distintos tipos de suelo, cuerpos de agua, vegetación, etc.) absorben y reflejan radiación (figura 14) de una parte del espectro electromagnético, dando una “firma” distinguible de radiación electromagnética reflejada y emitida (IAFE, 2000).

A partir del conocimiento de cuáles tipos de radiación son absorbidas por determinados objetos y las cantidades reflejadas por cada uno, es posible analizar las imágenes satelitales y determinar los diferentes objetos presentes en ellas y, más aun, establecer diferencias entre los mismos objetos en distintas condiciones del ambiente (por ejemplo, distinto grado de humedad en la vegetación).

Existen diversos trabajos que tratan este tema (Clark, 1957; Rowan et al., 1974; Bowers et al, 1996; Goetz et al., 1985; Hunt, 1977; Clark, 1957; Lang et al., 1987; Gupta, 1991; Rivard et al, 1992; Rivard et al., 1993), algunos de estos estudios sólo se dedican a la experimentación en laboratorio de las características espectrales de diferentes materiales entre los que se pueden citar a diferentes tipos de minerales, rocas y plantas. Con los trabajos realizados en estos laboratorios se da origen a las bibliotecas espectrales. Los estudios enfocados al mapeo de alguna zona utilizan la aplicación de las

características espectrales de las rocas y minerales con el objeto de facilitar el trabajo de identificación de rasgos sobre la imagen de satélite.

Hay diferentes maneras de obtener las firmas espectrales de minerales puros y roca: a) mediante el análisis en el laboratorio (Rowan *et al.*, 1974; Goetz *et al.*, 1985; Hunt, 1977; Rowan *et al.*, 1977; Gupta, 1991); b) con un análisis *in situ* por medio de espectroradiómetros portátiles (Sultan *et al.*, 1987; Vincent, 1997; Bowers y Rowan, 1996) y c) análisis directos sobre la imagen de satélite (Sultan *et al.*, 1987; Vincent, 1997; Sabins, 1997), como es el caso de este trabajo.

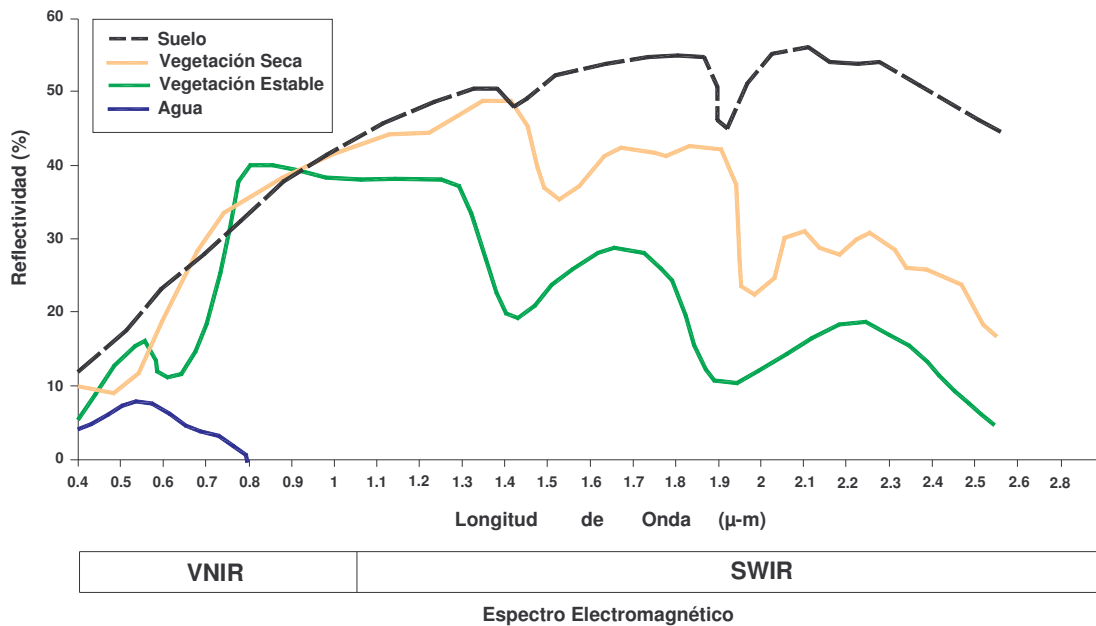


Figura 14. Firmas espectrales de algunos tipos de coberturas presentes en la superficie terrestre, generadas de imágenes Landsat TM (García-Varela, 2000). Ventanas espectrales: VNIR: Visible e infrarrojo cercano y SWIR: Infrarrojo de onda corta.

El análisis que se utilizó en esta tesis para generar las firmas espectrales fue el análisis directo sobre la imagen de satélite. El análisis consistió en lo siguiente:

1. Sobre la imagen mosaico MASTER, se vaciaron las coordenadas obtenidas con GPS sobre los sitios visitados en campo.
2. Sobre la imagen se trazó (con el programa ER Mapper 6.4) un polígono en cada sitio, con dimensiones similares a los cuadrantes montados en campo.

3. Con el programa ER Mapper 6.4 se calculó la estadística de los píxeles dentro de cada polígono trazado, incluyendo los valores: mínimo, máximo, media, mediana y matriz de covarianza.

4. Con un guión (script) para MathLab (v6.5) se extrajeron del archivo de estadística obtenido del paso anterior, los valores de la media en cada sitio en las 50 bandas del sensor MASTER, este vector de medias es un estimador de la firma espectral en el sitio muestreado. La gráfica del vector de medias contra su correspondiente longitud de onda es una representación visual de la firma espectral de cada sitio.

III. ANALISIS GEOMORFOLÓGICO DEL ABANICO ALUVIAL DEL ARROYO MATOMI.

III.1. Descripción general.

A lo largo de la vertiente oriental del escarpe del Golfo de California existen sistemas de abanicos aluviales, que vierten los sedimentos erosionados de las partes altas. En mapas topográficos, los abanicos pueden identificarse por un patrón de contornos semicirculares que se abren pendiente abajo y en los geológicos por la presencia de aluvión. La figura 15 muestra el mapa geológico de la zona de estudio (CETENAL, 1977) que incluye contornos topográficos y se pueden observar claramente los dos patrones que caracterizan a los aluviones, los contornos topográficos semicirculares y la presencia de aluvión.

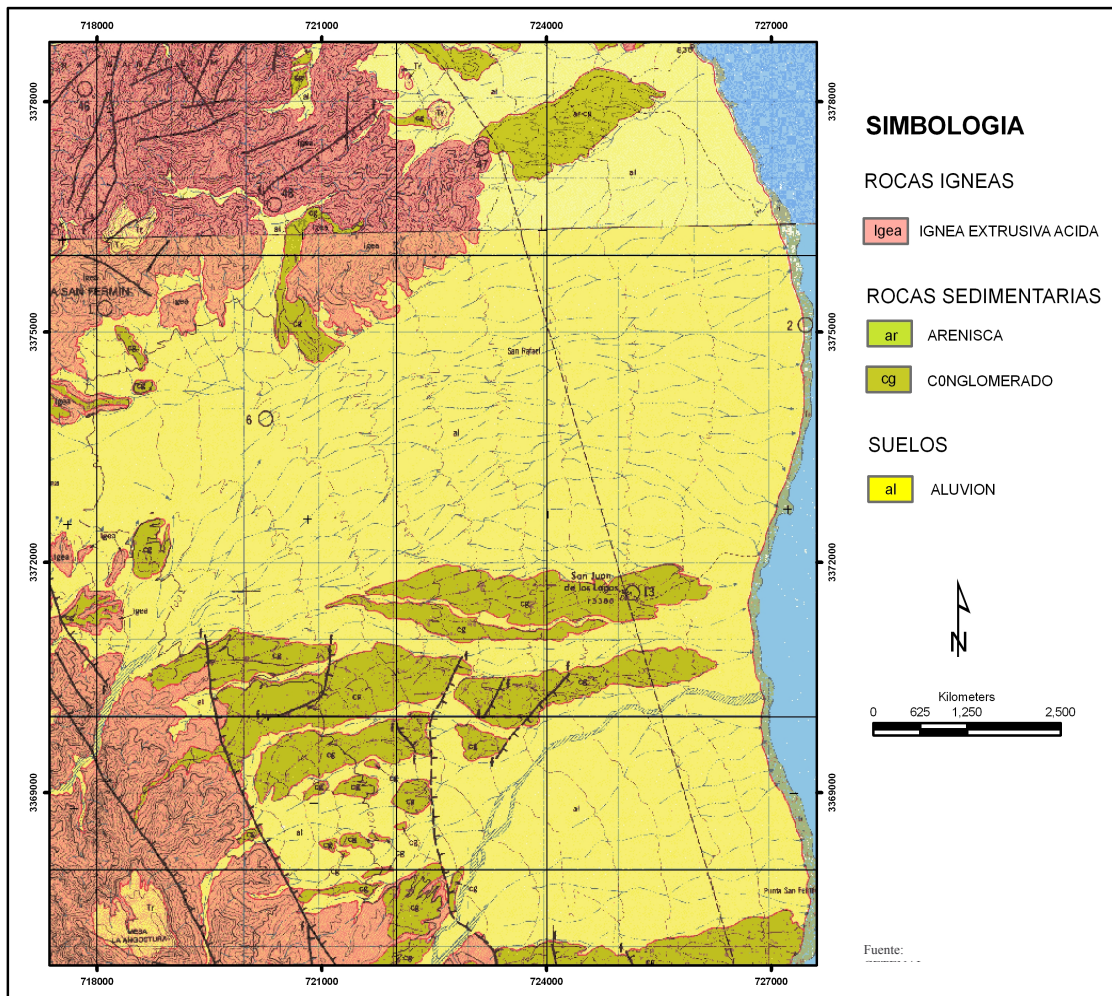


Figura 15. Mapa geológico del AAAM. Obtenido de CETENAL 1977, cartas H11B67 y H11B77.

En el caso de abanicos geológicamente jóvenes y activos, como es el caso del AM, los flujos torrenciales pueden suceder aleatoriamente sobre su superficie. Por lo tanto, toda la superficie representa riesgos potenciales de inundación, depositación y/o exhumación de sedimentos y otros desechos, siendo un sitio peligroso donde construir.

En regiones geológicamente más viejas, los procesos en los abanicos aluviales tienden a seguir patrones predecibles y los flujos pueden permanecer en cauces definidos. Abanicos o zonas de éste que no están sujetas a estos flujos son considerados como inactivos y pueden considerarse con menor riesgo para la construcción. Independientemente que un abanico se considere activo o inactivo, siempre existe cierto grado de incertidumbre sobre el riesgo de inundación.

Los flujos de escombros y desechos ocurren si existe un alto porcentaje de sedimentos finos (del 70 al 90% del peso) como limos y arcillas, en flujos que viajan sobre pendientes pronunciadas. El flujo de lodos transporta arenas, gravas, cantos, troncos y arbustos de la parte montañosa de la cuenca al abanico. Condiciones que favorecen el arrastre de escombros y desechos son: presencia de limos, arcillas y rocas no consolidadas en la cuenca de drenaje, escasa vegetación, precipitaciones intensas y sostenidas en la cuenca, y la presencia de pendientes pronunciadas en la cuenca y en el abanico (FEMA, 1989). Todas estas condiciones se presentan en la vertiente oriental del escarpe del Golfo de California cuando ocurren eventos de precipitación anómala. Uno de éstos casos en la cuenca del AM fue el paso del huracán Nora en Septiembre de 1997, con una precipitación extraordinaria de 300 mm en 24 horas (CNA, 2004).

La mezcla/proporción de cantos, grava, arena, limos y arcilla depende de los materiales fuente (roca madre) y del volumen y velocidad de la corriente. Por el gradiente en la velocidad de la corriente, los clastos son clasificados, los más grandes son depositados cerca del ápice del canal, en la primera pérdida de velocidad del flujo y los granos más finos son transportados pendiente abajo hasta la base del abanico. Los depósitos de sedimentos generalmente son angostos e inclinados en la parte alta del abanico, ensanchándose en forma de cuña o cono al esparcirse a las partes bajas.

Por cambios climáticos o efectos tectónicos, los abanicos pueden ser interrumpidos por los ciclos de inundación/depositación así como reactivados nuevamente. Cuando estos no son interrumpidos, los depósitos permanecen estáticos desarrollando superficies estables conocidas como pavimentos del desierto (Cooke et al, 1973; McFadden et al. 1987). Estas superficies gradualmente desarrollan barniz del desierto.

Cambios subsecuentes en el clima o elevación del terreno pueden alterar de nuevo los ciclos de inundación/depositación de tal manera que los canales viejos son rejuvenecidos o eliminados, así como también se forman nuevos canales. Los depósitos antiguos pueden ser erosionados y convertidos en unidades más pequeñas, erosionados o invadidos con nuevas cargas de sedimento.

III.2. Cuencas hidrográficas.

El arroyo Matomí (AM) nace en las estribaciones de la Sierra San Pedro Mártir y desemboca en la llanura litoral del Golfo de California en forma de delta.

El abanico (Figura 16) es abastecido de sedimentos por tres cuencas; la primera, Cuenca Matomí es la principal con una superficie de 545 km², la segunda cuenca denominada El Canelo, tiene una superficie de 307 km² y por último la cuenca La Cantera, cuenta con una superficie de 152 km². El nombre asignado a las cuencas fue a partir del nombre del arroyo principal que las drenan.

El AM recibe también los escurrimientos del límite sur de la Sierra San Felipe y la Sierra Santa Isabel. El primer cambio de pendiente y por lo tanto de velocidad en los escurrimientos septentrionales de la cuenca, ocurre al pie de la sierra de San Pedro Mártir depositando sedimentos en el Valle Chico. El escurrimiento continúa sobre pendientes suaves de los llanos de San Fermín hasta llegar a un estrechamiento del cauce al atravesar la sierra de San Fermín. El cauce continúa por un cañón estrecho que atraviesa esta sierra baja (García-Puga, 2000) para finalmente dispersar su flujo en la planicie aluvial del arroyo Matomí.

El AEC es el segundo en importancia, tiene una dirección preferencial sur y nace en las montañas de la Sierra Santa Isabel hacia el suroeste. El ALC nace al sureste del arroyo AEC, en las montañas de la Sierra Santa Isabel.

Estos arroyos cortan diversos tipos de rocas (Figura 16), los arroyos AEC y ALC drenan únicamente a la Provincia Volcánica de Puertecitos (PVC), mientras que el AM drena a regiones en donde aflora el basamento granítico metamórfico, además de las rocas volcánicas del Mioceno-Plioceno (Gastil, 1975). Los límites laterales de abanicos aluviales coalescentes (ver figura 2, capítulo I) pueden ser marcados por crestas o valles topográficos. En algunas ocasiones es posible distinguir los límites gracias a las diferencias en la litología de las rocas en la cuenca madre.

En la parte norte de la cuenca del AM, en el aluvión de los llanos de San Fermín se pueden apreciar estas diferencias en la composición de la roca madre (Figura 2). Por el norte se vierten sedimentos de rocas graníticas con tonalidades claras, mientras que por el sur los clastos en los arroyos son de rocas volcánicas en colores más oscuros. Los clastos son transportados aguas abajo, atravesando el cañón de la sierra de San Fermín para eventualmente depositarse en el AAAM.

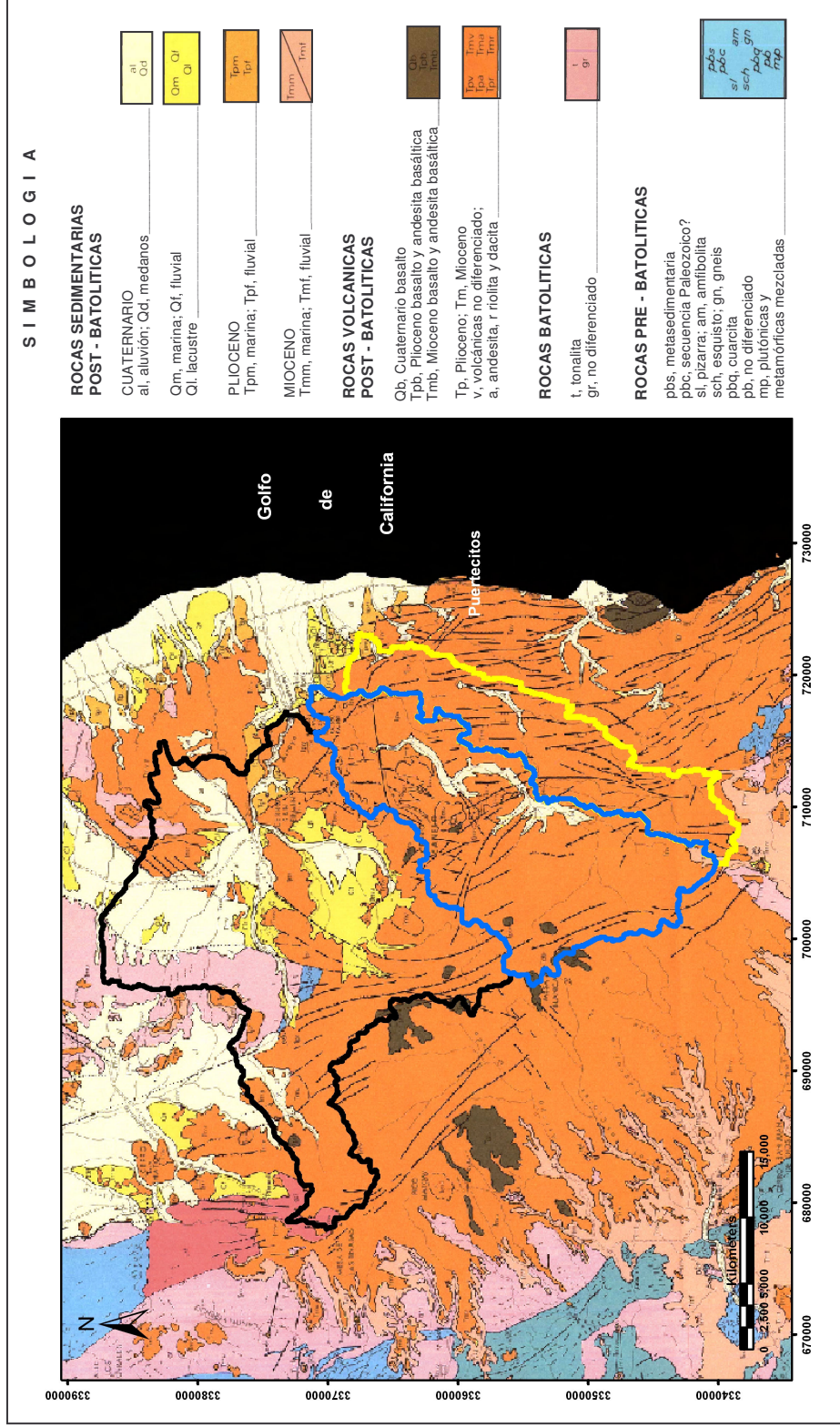


Figura 16. Mapa geológico regional (tomado de Gastil et al., 1975) que muestra las cuencas del Arroyo Matomí (AM línea color negro), arroyo El Canelo (AEC en azul), arroyo La Cantera (ALC en amarillo) y la litología que drena a cada una de ellas.

III.3. Descripción de las geoformas.

El AAAM está compuesto por diversas geoformas, ahí se depositan los sedimentos transportados por el AM, AEC y ALC. El ápice topográfico (AT) (figura 17) de un abanico es el extremo más elevado de la geoforma y el ápice hidrográfico (AH) es el punto más alto del abanico donde existe evidencia física de bifurcación del canal principal; la localización del AT puede ser coincidente a éste último (AH), o encontrarse aguas abajo del primero. El AH (figura 17) puede ser dependiente de la descarga y puede variar dependiendo de la magnitud del flujo (FEMA, 1989).

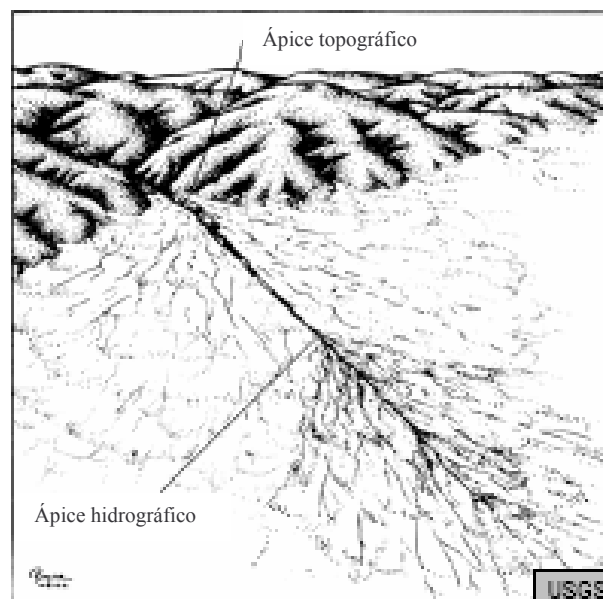


Figura 17. Localización del ápice topográfico (AT) e hidrológico (AH) sobre un abanico aluvial. Esquema obtenido de US Geological Survey (USGS).

Como en la mayoría de los abanicos aluviales jóvenes y activos, el ápice topográfico e hidrológico del AAAM se ubica en el mismo sitio, en la parte más alta de éste donde el escurrimiento emerge de los cañones bifurcando el flujo para disminuir su velocidad e iniciar el depósito de sedimentos. (figura 18).

El AH y AT en el caso del AM se ubica en el punto donde el arroyo pasa a través de un lomerío (con una dirección preferencial NE) perteneciente a la Sierra San Fermín y una cadena de lomeríos con pendientes suaves (con una dirección preferencial NW) perteneciente a la Sierra Santa Isabel; en el punto anterior el arroyo empieza a bifurcarse creando un delta sobre la planicie aluvial (figura 18).

El AH y AT del AEC se ubica en la desembocadura del cañón de la Mesa el Tábano, este se encuentra al Sur del AM. El AEC al bifurcarse, uno de sus principales afluentes se derrama hacia el AM; este fenómeno aparece en caso de grandes crecidas y en ríos con altos grados de acumulación de materiales, que permiten el desfogue del cauce, el cual busca otros caminos. Se localizan en las llanuras de relleno y en los pie de montes de las altas montañas, donde existe acumulación masiva de materiales en los conos aluviales como es en este caso, finalmente se difuminan las líneas divisorias y los afluentes restantes se extienden hacia la margen sur de la planicie aluvial, algunos de ellos cortan pequeñas terrazas que cuentan con muy pocos metros de altura (1m de altura aproximadamente) presentando barniz del desierto en su superficie expuesta (Figura 18).

El AH y AT del ALC se encuentra en la fracción sur del cono del AAAM, se puede observar en la figura 18, estos se encuentran donde nace en la desembocadura del

cañón, se encuentran sobre el canal de desagüe y el ALC al bifurcarse forma un pequeño delta sobre la planicie aluvial.

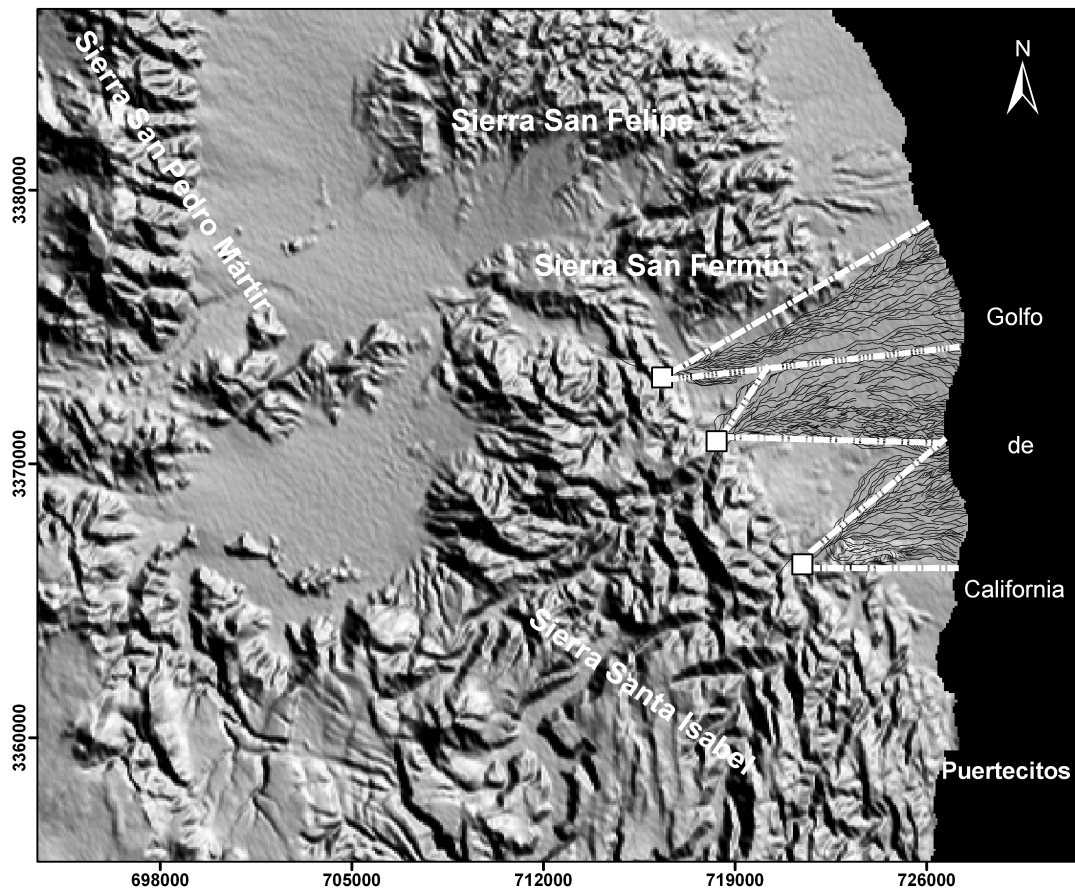


Figura 18. Los cuadrados color blanco representan los AT y AH de cada arroyo y las líneas punteadas color blanco indican las áreas activas de la red hidrográficas de los arroyos. Esta figura se obtuvo a partir del sombreado del modelo digital de elevación de INEGI.

III.4. Sistema de drenaje.

Los sistemas de drenaje están compuestos por una red interconectada de corrientes que forma modelos concretos (Edward J., 1999). La naturaleza de estos modelos puede variar dependiendo del tipo de terreno en que se encuentre, esencialmente estos se desarrollan en función al tipo de roca sobre el cual se desarrolla la corriente o dependiendo si en la zona existen fallas, pliegues o alguna otra estructura.

En las siguientes figuras (Figuras 19, 20 y 21) se muestran los 3 arroyos que conforman al AAAM. La red de drenaje se obtuvo a partir de la digitalización de los arroyos sobre la imagen mosaico MASTER.

El sistema de drenaje predominante en estos, esta conformado por el drenaje entrecruzado, las formas se compone de una red de cauces poco profundos, se desarrollan en llanuras o terrazas aluviales compuestas de materiales gruesos y permeables (Edward et al, 1999).

La arena gruesa transportada durante las crecidas y depositada en el curso de los ríos puede permitir que gran parte del agua fluya a través de ella. La parte del caudal que no se infiltra a través de la arena puede distribuirse en cauces que derivan entre barras arenosas (Edward et al, 1999).

Los terrenos con esta forma de drenaje pueden ser objeto de intensa explotación de arena y grava, así como fuente de importantes caudales de agua en pozos poco profundos.

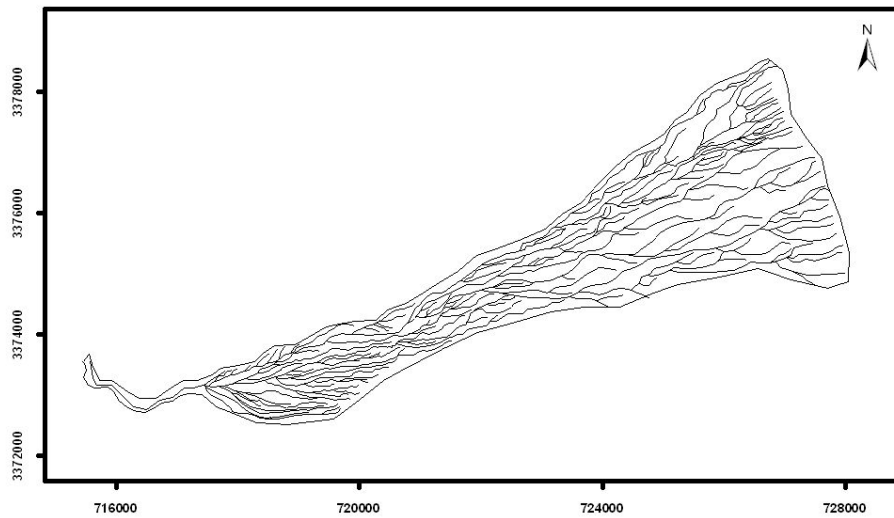


Figura 19. Red hidrográfica del AM, la red se obtuvo a partir de la digitalización de la imagen mosaico MASTER.

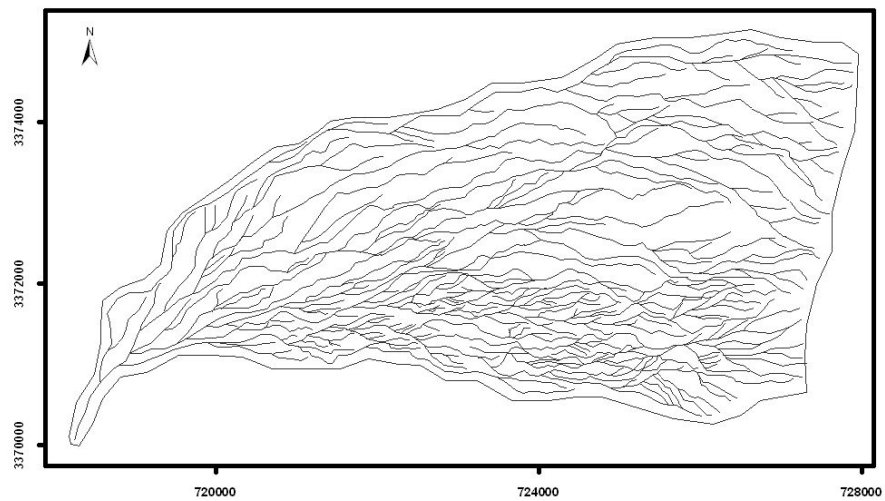


Figura 20. Red hidrográfica del AEC, la red se obtuvo a partir de la digitalización de la imagen mosaico MASTER.

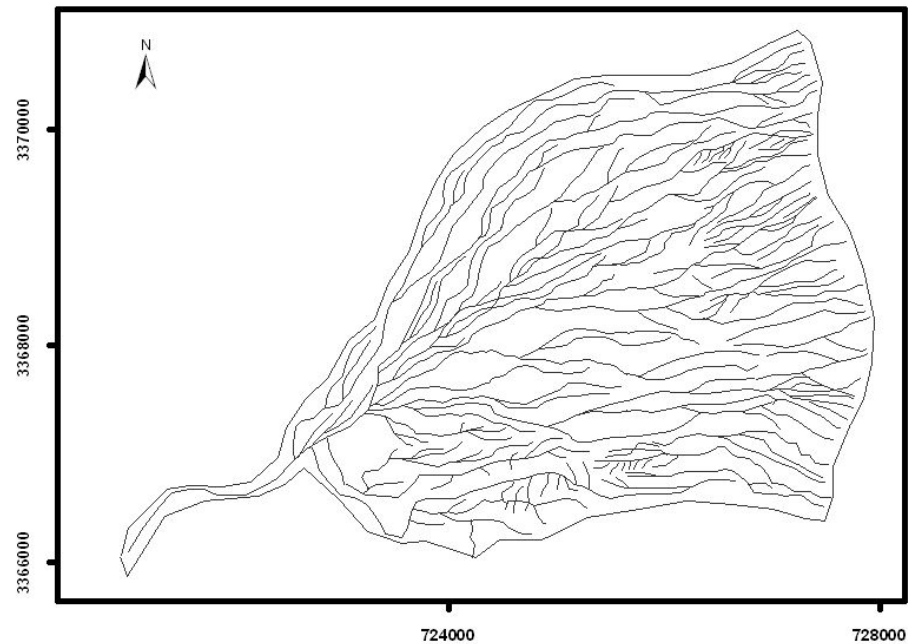


Figura 21. Red hidrográfica del ALC, la red se obtuvo a partir de la digitalización de la imagen mosaico MASTER

III.5. Geomorfología.

Los procesos geomorfológicos en esta zona se dan por dos grandes geoformas diferentes, una de ellas la Sierra San Pedro Mártir y las sierras aledañas a la zona de estudio (Sierra San Fermín y Sierra Santa Isabel). Estas se encuentran en un ambiente morfogenético erosional que aporta todo el sedimento al área de estudio. La otra es la planicie costera en forma de triangulo del AAAM que captura el sedimento aportado por las sierras, a esta zona le corresponde un ambiente morfogenético deposicional

Basado en el trabajo de levantamiento de campo y la interpretación de las imágenes de satélite se describieron las 3 unidades geomorfológicas (Antezana, 2000)

siguientes; identificadas en el área de estudio como: Piedemonte Alto, Piedemonte bajo y Zona de Playa y por ultimo La Sierra Baja denominada así por García-Puga, 2000.

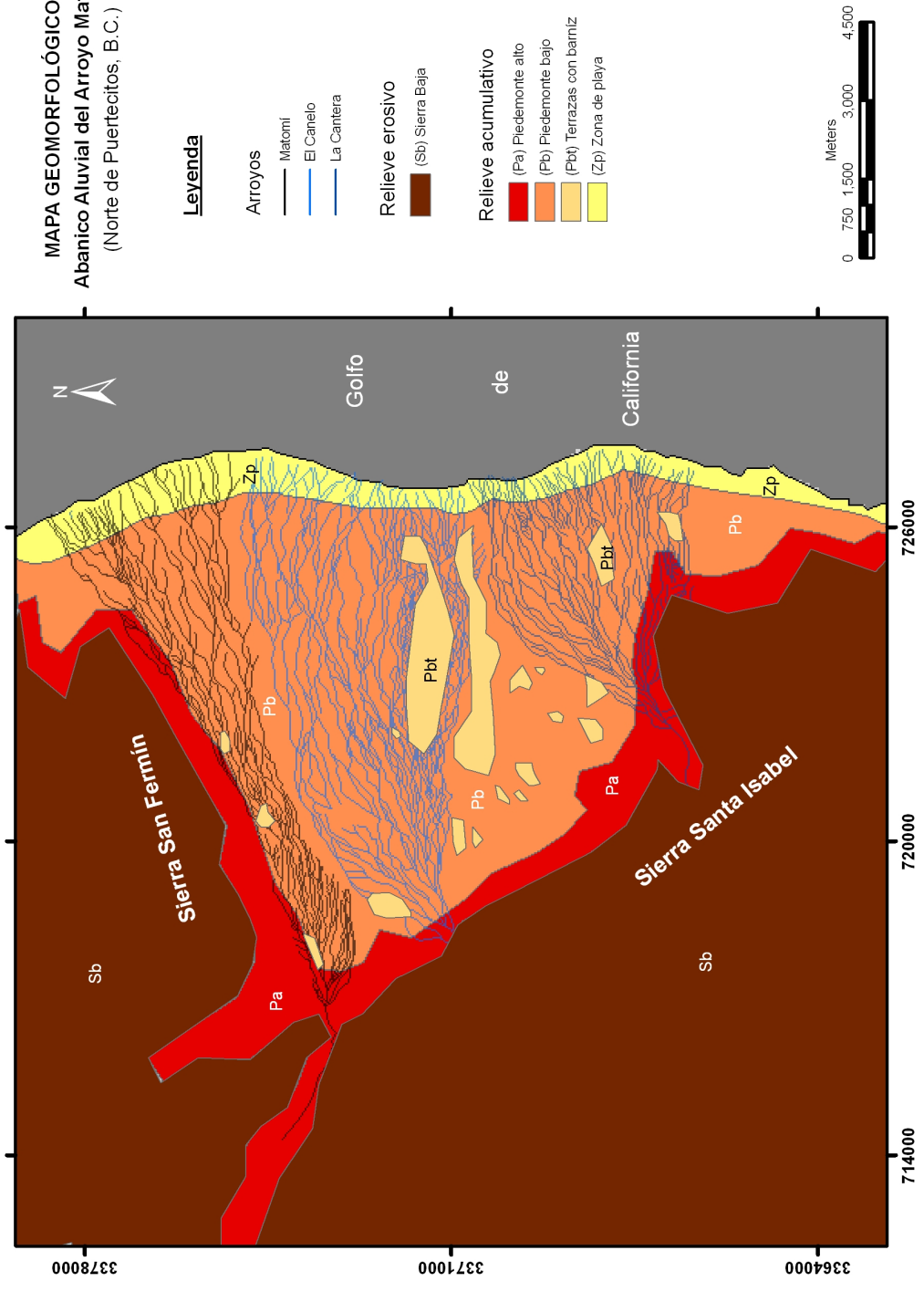
Piedemonte Alto (Pa): Distribuido en las partes adyacentes a las colinas y montañas (Figura 22). Esta formado por acumulación de sedimentos cuaternarios sueltos y gruesos, este comprende las siguientes formas fisiográficas o paisajes; aquí comienzan las partes más altas del abanico aluvial que contienen laderas cóncavas y convexas. Esta unidad geomorfológica esta formada por sedimentos de material trasladado por las corrientes que fluyen desde las zonas circundantes más elevadas, compuesto de material detrítico con una granulometría de rocas gruesas con formas angulosas a subangulosas en la parte del ápice topográfico del abanico.

Piedemonte Bajo (Pb): Ubicado debajo del piedemonte alto (Figura 22). Esta unidad está compuesta por la llanura aluvial y por terrazas aluviales con desarrollo de barniz del desierto. Presenta un paisaje con un relieve poco ondulado y pendientes suaves. Formado por material aluvial y detrítico cuaternario transportado desde las zonas circundantes más altas, con una granulometría de rocas centimétricas semiredondeadas a redondeadas. La llanura aluvial está representada por las zonas que no presentan ningún escarpe en la topografía, mientras que las terrazas con barniz del desierto (**Pbt**) se localizan en zonas un poco más elevadas (< 1 m) que la llanura aluvial.

Zona de playa (Gp): Paisaje ubicado por debajo del piedemonte bajo (Figura 22), presenta un relieve con una superficie plana o casi plana, formada por procesos de erosión, meteorización y transporte de detritos. Los sedimentos en esta zona el tipo de material esta pobremente consolidado y es de grano muy fino (arcilla) y arena de grano medio a fino, con algunos remanentes de detritos de tamaños centimétricos con forma subredondeada a redondeada.

Sierra Baja (Sb): García-Puga en el 2000 la define como las sierras que presentan alturas que varían desde 300 a 500 metros con pendientes abruptas. Esta zona está representada por las sierras adyacentes a la zona de estudio. Sierra San Fermín y Sierra Santa Isabel.

MAPA GEOMORFOLÓGICO
Abanico Aluvial del Arroyo Matomí
 (Norte de Puertecitos, B.C.)



Leyenda

Arroyos

- Matomí
- El Canelo
- La Cantera

Relieve erosivo

- (Sb) Sierra Baja

Relieve acumulativo

- (Pa) PieDEMonte alto
- (Pb) PieDEMonte bajo
- (Pbt) Terrazas con barniz
- (Zp) Zona de playa



Figura 22. Mapa geomorfológico del AAAM, ubicado al Norte de Puertecitos, Baja California.

IV. ANALISIS ESPECTRAL Y LITOLOGICO DEL ABANICO ALUVIAL DEL ARROYO MATOMI.

Para este análisis se utilizaron las imágenes hiperespectrales (50 bandas) del sensor MASTER. Se integró un mosaico a partir de las líneas de vuelo 6 a 11 que cubren el AAAM (figura 8 del capítulo I). Cada línea cubre un ancho de barrido aproximado de 5 km y están segmentadas en archivos de 500 MB en promedio. Primeramente se georefirieron 9 segmentos de manera independientemente para posteriormente integrarlos. Los puntos de control se obtuvieron de una imagen ASTER (Tabla I- capítulo I), estos se obtuvieron a partir de los mapas topográficos H11B67 y H11B77 escala 1:50,000 de CETENAL 1977. La resolución espacial de las imágenes resultantes fue de 5 m en sus 50 bandas.

A través de la fotointerpretación del mosaico, se seleccionaron zonas de interés que posteriormente se muestrearon en campo. Con la información obtenida en el campo, se calcularon índices de contenido de roca y se extrajeron las firmas espectrales a los sitios correspondientes en las imágenes MASTER, asignando a cada sitio un vector con los 50 valores promedio registrados por el sensor en cada banda. El objetivo es correlacionar el índice de contenido de roca con las firmas espectrales.

IV. 1. Selección de zonas de interés.

Para seleccionar las zonas a muestrear en campo sobre las imágenes MASTER, se probaron varias ternas de bandas en compuestos en falso color, eligiendo la combinación de las bandas 23 - 9 - 2 en RVA respectivamente. Las longitudes de onda centrales de estas bandas son 0.46 μm , 0.865 μm y 2.26 μm (anexo B), las bandas 23 y 9 se ubican en la región espectral VNIR y la banda 2 en la región espectral SWIR. No se hizo un análisis exhaustivo ni estadístico como el descrito por Noyola-Medrano et al. (2005) sobre las 42, 840 (Tabla III – Capítulo II) posibles ternas que se pueden seleccionar con las 50 bandas del sensor MASTER. La selección se hizo en base a la preferencia del fotointérprete. Sobre el compuesto 23-9-2 se buscaron zonas que presentaron contrastes marcados en la coloración de la superficie, indicando discrepancias en la composición de los clastos. Se seleccionaron 46 sitios sobre las imágenes para visitar en campo y recolectar información del área de estudio (figura 23).

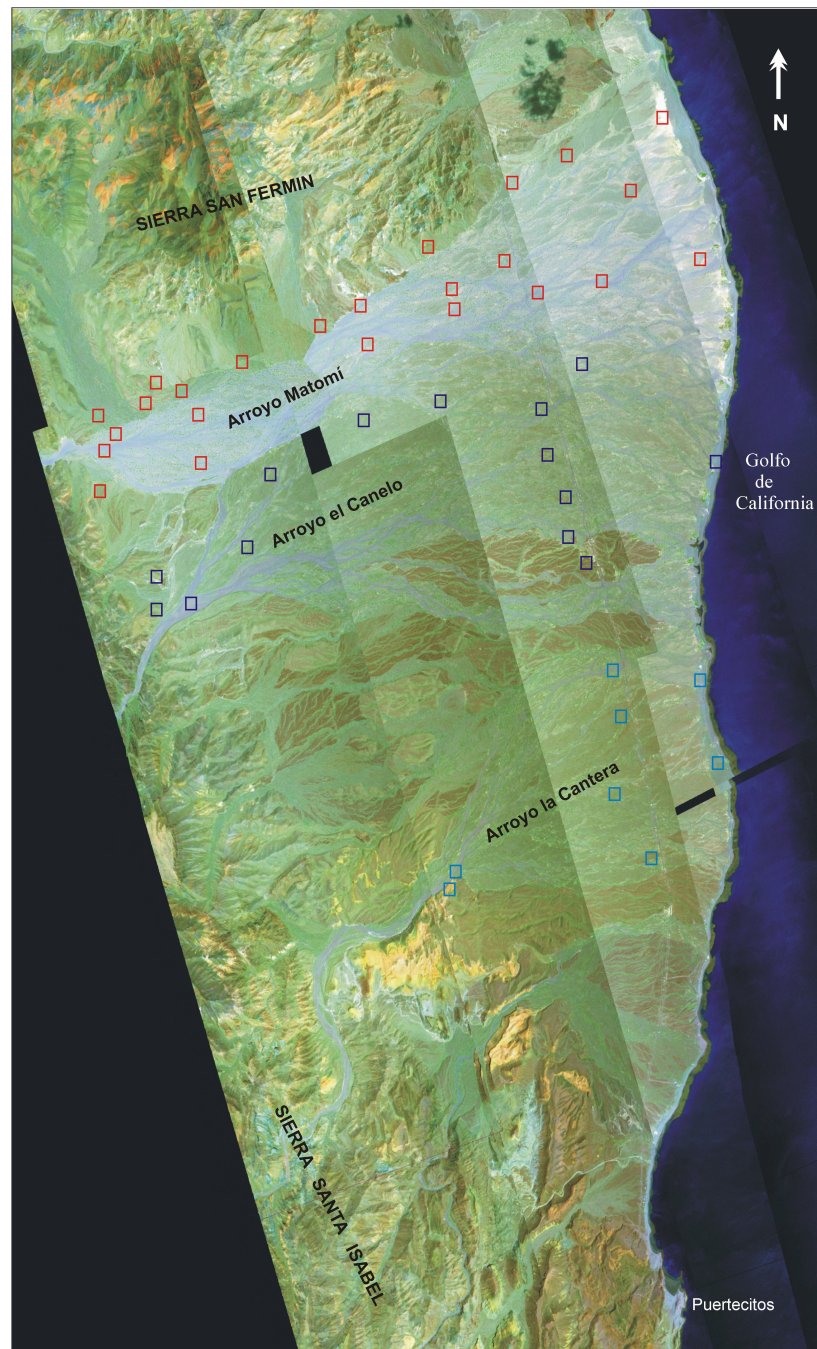


Figura 23. Mosaico de imágenes MASTER, combinación 23-9-2 (RVA). Los cuadros representan las zonas visitadas en campo. Los cuadros en color rojo corresponden al AM; en color azul marino pertenecen al Arroyo el Canelo (AEC) y en color azul claro enmarcan las zonas del ALC.

IV.2. Clasificación de clastos en grupos.

Los grupos de clastos que se mencionan en esta sección provienen de las Sierras que drenan hacia las tres cuencas hidrológicas que engloban al abanico aluvial. Hacia el Noroeste del abanico aluvial, se encuentra la Sierra de San Felipe compuesta por rocas pre-batolíticas, batolíticas y volcánicas post-batolíticas (Gastil et al., 1975). La Sierra Santa Isabel al Suroeste, San Fermín al Norte y San Pedro Mártir al Oeste, aportando primordialmente clastos de rocas volcánicas post batolíticas (Gastil et al., 1975)

A partir del análisis de las muestras colectadas en campo, se identificaron 5 grupos de rocas volcánicas que se describen a continuación:

Grupo V1. Compuesto por clastos de andesita y dacita de hornblenda. Presentan textura porfídica en una matriz afanítica. La andesita presenta variación de color de verde claro, gris verdoso ocre y en su parte fresca presenta un color gris claro. La dacita presenta un color rosado oscuro, color marrón en fractura fresca y presentan menor contenido de hornblenda. Los cristales de hornblenda son prismáticos y alargados. Este grupo es característico porque sus clastos están subredondeados y derivan de afloramientos pertenecientes al arco volcánico Miocénico (Martín-Barajas et al., 1995).

Grupo V2. Está representado por tobas vítreas, densamente soldadas, presentan esferulitas y flamas (fiames) que define una foliación eutaxítica. También se incluyen clastos de grano muy fino y compacto. Los colores varían de rosa a anaranjado. En

fractura fresca presentan coloraciones morado oscuro (densamente soldada) y rosa cenizo en clastos con menor soldamiento. En su mayoría son de composición riolítica con un alto porcentaje de sílice (aproximadamente entre un 60 – 70% de sílice) y en su mayoría pertenecen a dos grupos de ignimbritas de 6 y 3 Ma (Martín-Barajas et al., 1995; Lewis, 1996).

Grupo V3. Este grupo está compuesto por rocas oscuras, que incluye clastos de lavas de composición andesita a basalto, incluyendo aglutinados de fragmentos máficos. En este grupo dominan los clastos con textura afanítica, y menos de 5-10% de cristales. El color varía de gris rojizo, negro gris oscuro y rojizo oscuro.

Grupo V4. Comprende principalmente clastos de tobas vítreas pobremente soldadas, con muy pocos líticos. Son poco densas y no soldadas, al parecer no resisten mucho el transporte. Presentan coloraciones de gris claro a amarillo y rojo ocre. Su forma es muy particular y tiende a ser subredondeada.

Grupo V5. Este grupo incluye principalmente clastos de lava de riolita vítrea, con colores oscuros y claros, en su parte fresca muestran una coloración verde oscuro vítreo. Clastos de forma subangulosa.

Además de estos grupos de rocas volcánicas también se definieron los siguientes grupos de clastos:

Bioclastos

Clastos de Coquina: rocas sedimentarias de grano grueso de origen bioquímico compuestas de fragmentos de conchas. Presenta coloraciones amarillentas a blancas.

Rocas Metamórficas

Clastos de cuarcita: roca metamórfica formada exclusivamente por cuarzo, presenta una textura afanítica y un color gris claro a oscuro en su parte expuesta y fresca, respectivamente.

Clastos de cuarzo lechoso: se distingue por su dureza y por su coloración blanca en el exterior al igual que en su parte fresca. Se observó en clastos de forma subangulosa.

Clastos de mármol: grupo compuesto de rocas metamórficas cristalinas de grano grueso, derivadas de calizas o dolomías. El color en su parte expuesta y parte fresca es de color blanco a gris oscuro.

Rocas Ígneas Intrusivas

Clastos de rocas granítica: rocas ígneas faneríticas compuestas por alrededor de 25% a 35% de cuarzo y más del 50% de feldespato potásico y plagioclasa sódica; con menos de 15% de minerales máficos. Su forma es subredondeada.

IV.3. Índices de contenido de roca.

Con la información recolectada en campo, se realizaron gráficas que muestran los porcentajes de los grupos de clastos descritos. Estos porcentajes reflejan tanto el tipo de roca dominante en el aluvión de cada sitio, como también la posible procedencia de los clastos que se encuentran en el abanico aluvial.

Con esta información se realizó una caracterización litológica de los sitios que presentaron contrastes notables en la coloración sobre el compuesto en falso color 23-9-2 del mosaico de imágenes MASTER.

La caracterización litológica se llevó a cabo sobre los tres principales arroyos que conforman al AAAM: AM, AEC y ALC.

IV.3.1. Caracterización litológica del AM.

Sobre el AM se visitaron 25 sitios de muestreo, de los cuales se discriminaron aquellos que presentaron información redundante. Resultando 16 sitios, los cuales se muestran en la figura 24.

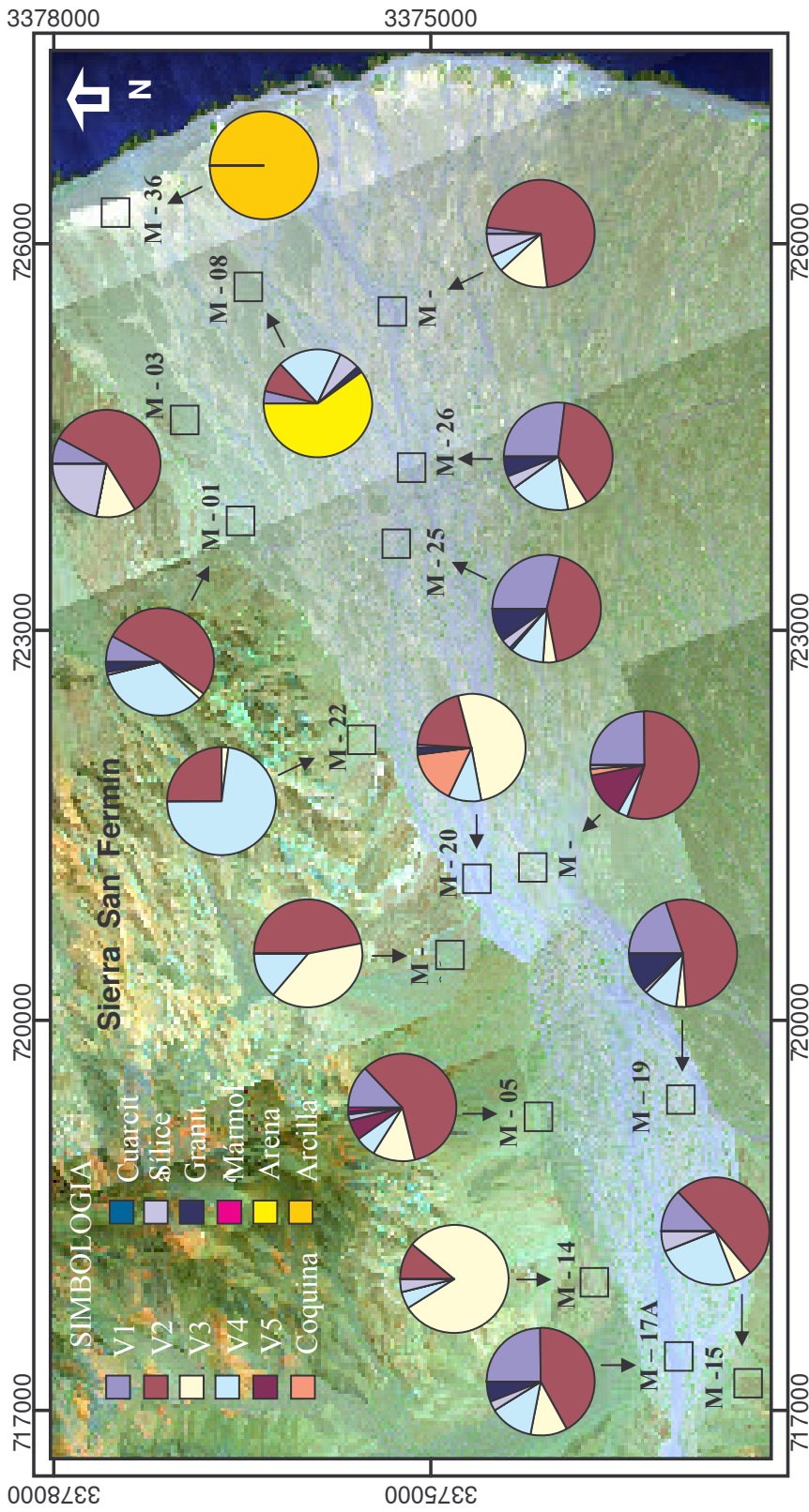


Figura 24. Imagen del AM, los cuadros representan la localización de los sitios muestreados sobre el arroyo y las gráficas de pastel muestran el contenido de roca en cada sitio del AM (Imagen mosaico del sensor MASTER, RVA, 23-9-2).

En la parte proximal al AT y AH del AM los clastos más abundantes son el grupo V2, la proporción aproximada de estos es de cuarenta y cinco por ciento, mientras que los clastos de V1 aparece en menor abundancia (25% aproximadamente), y los clastos de rocas oscuras V3 aparecen cerca de un 10 %.(M-15, M-17A y M-05).

Los sitios (M-14, M-06 y M-20) que se encuentran en las partes bajas (pie de monte bajo de la Sierra San Fermín, presentan clastos del grupo V3 (45 % aproximadamente) y en menor proporción los clastos de V2 (cerca del 40%).

Siguiendo en la dirección hacia la desembocadura del arroyo y sobre las partes bajas de la Sierra Fermín; los sitios (M-22 y M-01) presentan grandes proporciones (60% aproximadamente) de clastos de V2 y V4, presentando disminución de rocas oscuras de tipo V3.

Las zonas (M-19, M-21, M-25, M-26 y M-29) que colindan con el AEC son muy similares entre sí ya que la mayoría de ellas presentan en mayor proporción clastos de V2 y en proporciones pequeñas los clastos de V1, V3 y V4.

Hacia la parte central del AM y cerca de la desembocadura en la parte distal del abanico, los clastos han sufrido un largo acarreo que origina la degradación y clasificación de estos en tamaños más pequeños. En proporciones menores aparecen clastos de V2 y V4.

En el cauce del arroyo aparecen clastos de Granito en algunos sitios en mayor (M-08) o menor proporción (M-03). (Ver figura 24).

En el piedemonte de la Sierra San Fermín se ubica el sitio M-20, el sitio es singular debido ya que presenta un 20% de clastos de coquina que desarrollaron una capa de barniz del desierto en su superficie.

IV.3.2. Caracterización litológica del AEC.

Sobre el AEC se visitaron 14 sitios de muestreo, al igual que en el AM se discriminaron aquellos sitios que presentaron información redundante, quedando finalmente 8 sitios (ver figura 25).

La característica principal de este arroyo es que presenta proporciones de clastos del grupo V2 a lo largo de todo el arroyo. Y los clastos de V3 y V1 (C-60, C-62 y C-44) aparecen en proporciones muy pequeñas (20 – 25% aproximadamente). En el AT del arroyo los sitios (C-46, C-47 y C-49) presentan clastos de sílice (cerca del 10%). Llegando a la desembocadura en la zona de playa el sitio C-67 presentan un 50% aproximadamente de fragmentos de conchas y clastos retrabajados de tobas del grupo V4.

La diferencia principal de este arroyo es que no presenta clastos de granito debido a que la cuenca que drena hacia este arroyo no aporta este tipo de rocas.

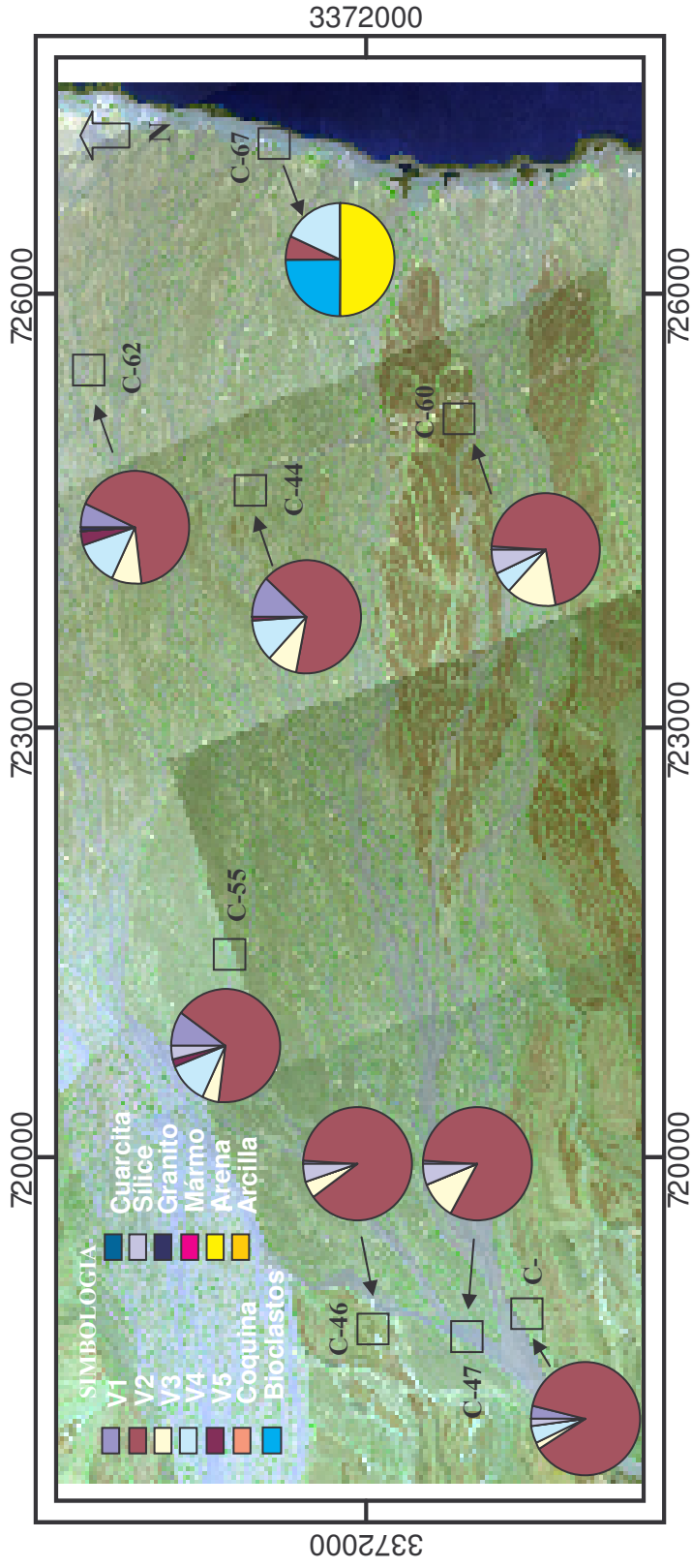


Figura 25. Los cuadros representan los sitios muestreados sobre el arroyo y las gráficas muestran el contenido de tipo de roca en cada sitio del AEC (Imagen del mosaico MASTER, RVA 23- 9-2)

IV.3.3. Caracterización litológica del ALC.

Sobre el ALC se visitaron 9 sitios de muestreo, se discriminaron los sitios que presentaron información redundante. En la figura 26 se muestran los 4 sitios resultantes.

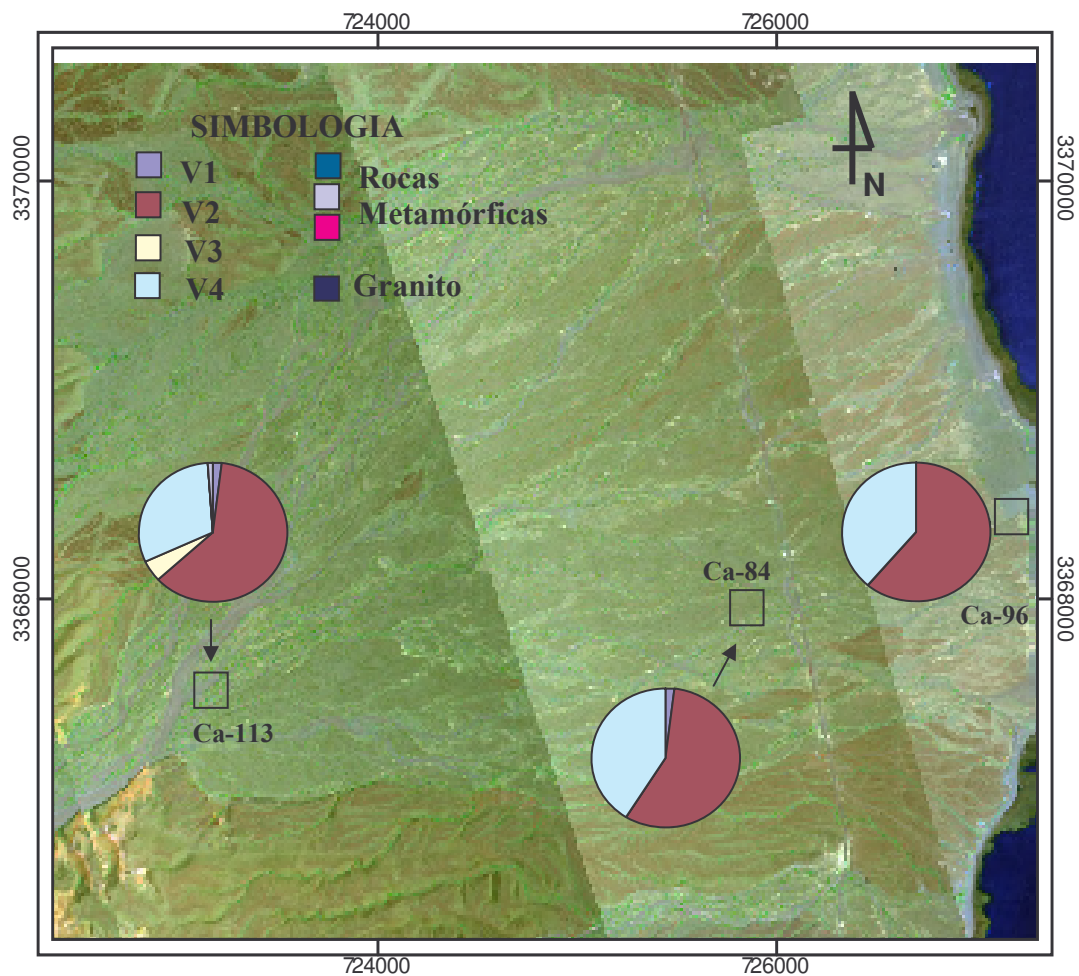


Figura 26. Perfil longitudinal del ALC. Los cuadros representan los sitios muestreados sobre el arroyo y las gráficas muestran el contenido de tipo de roca en cada sitio (Imagen del mosaico MASTER, RVA 23-9-2).

Este arroyo es singular ya que el contenido de clastos en los tres sitios son muy similares (Ca-113, Ca-84 y Ca-96), presentan clastos de tobas vítreas densamente soldadas en un 55% aproximadamente y en un 45% aparecen los clastos de tobas vítreas pobremente soldadas.

El sitio Ca-113 es el único que presenta clastos (10 %) de rocas oscuras, que incluye clastos de lavas de composición andesita a basalto.

IV.4. Firmas espectrales.

Las gráficas de las firmas espectrales nos muestran los patrones en la radiación electromagnética reflejada y absorbida por los diferentes tipos de cubierta terrestre en función de la longitud de onda; los datos multiespectrales obtenidos por los sensores remotos nos ayudan a identificar los diversos tipos de cobertura a través de la respuesta registrada en las diferentes ventanas del espectro electromagnético.

IV.4.1. Comparación de firmas espectrales.

Las gráficas de las firmas que se presentan a continuación son la respuesta promedio en las 50 bandas del sensor MASTER de los diferentes sitios del AAAM donde se calculó el índice de contenido de roca. La visita a campo permitió apreciar las características y condiciones de los sitios estudiados, ubicarlos y así obtener las firmas espectrales.

A manera de presentación, en la figura 27 se muestra la firma espectral del sitio M-06 del AM, donde se gráfica el valor promedio registrado por el sensor MASTER en un polígono de 5 x 5 m versus la longitud de onda de las ventanas espectrales del sensor, indicando también las regiones del espectro electromagnético.

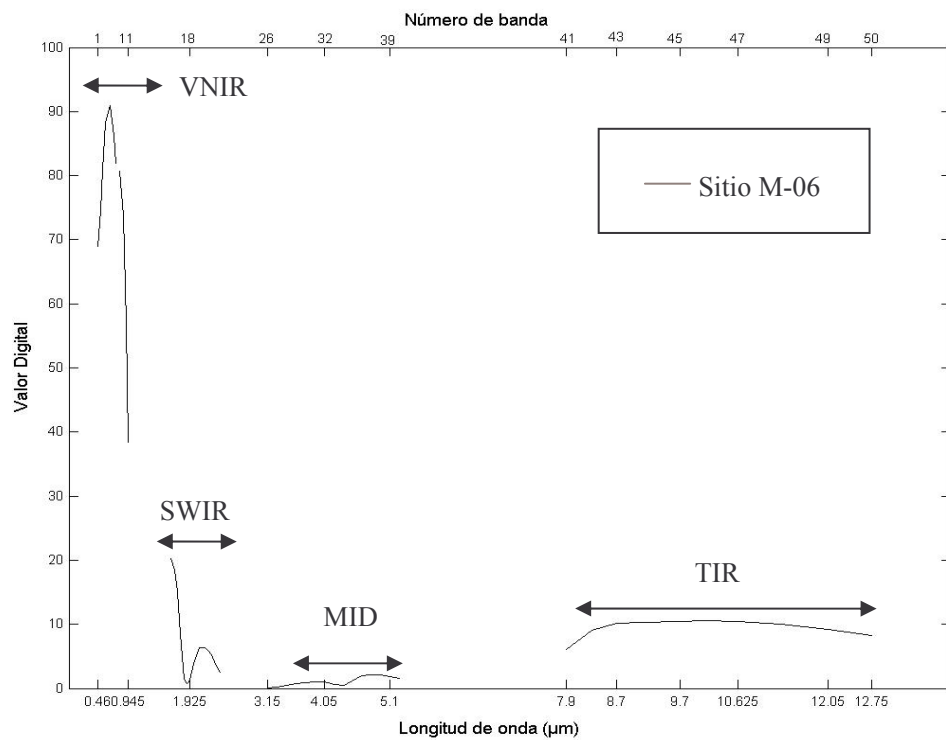


Figura 27. Firma espectral del sitio M-06, correspondiente a la parte central del AM. Ventanas espectrales - VNIR: visible e infrarrojo cercano, SWIR: infrarrojo de onda corta, MID: infrarrojo medio y TIR: infrarrojo térmico.

Retomando el esquema utilizado en la sección anterior, se muestran las firmas espectrales de cada arroyo. Debido a que algunos sitios presentan porcentajes similares en los índices de contenido de roca, se seleccionaron sitios representativos de cada arroyo.

Los sitios seleccionados fueron: M-01, M-06, M-08, M-20, M-21, M-17A y M-36 del AM; C-46, C-44 y C-67 del AEC y Ca-113, Ca-84 y Ca-93 del ALC.

En las figura 28, 29 y 30 se muestran las firmas espectrales de los sitios seleccionados en los arroyos AM, ALC y AEC respectivamente. Las gráficas muestran las 5 regiones del espectro electromagnético, de las cuales las regiones de VNIR y SWIR, es donde existen mayores diferencias entre las firmas, mientras que en las regiones de MID y TIR no muestran cambios significativos.

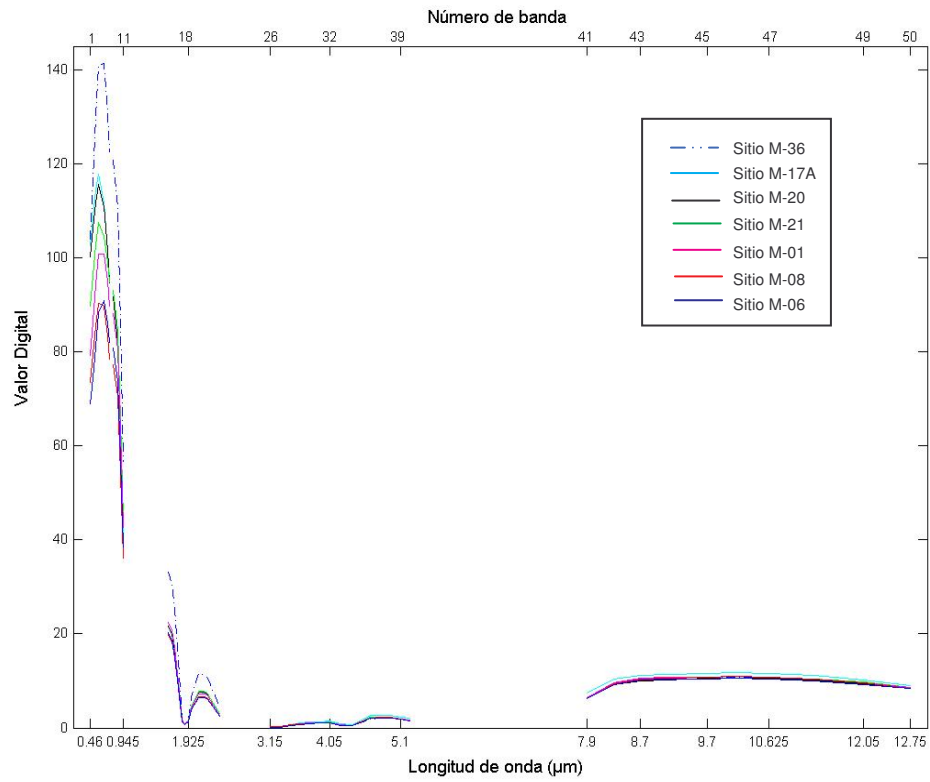


Figura 28. Firmas espectrales (AM) de los sitios M-36, M-17A, M-06, M-01, M-21, M-20 y M-08 del AM; grupos espectrales: VNIR, SWIR, MID y TIR.

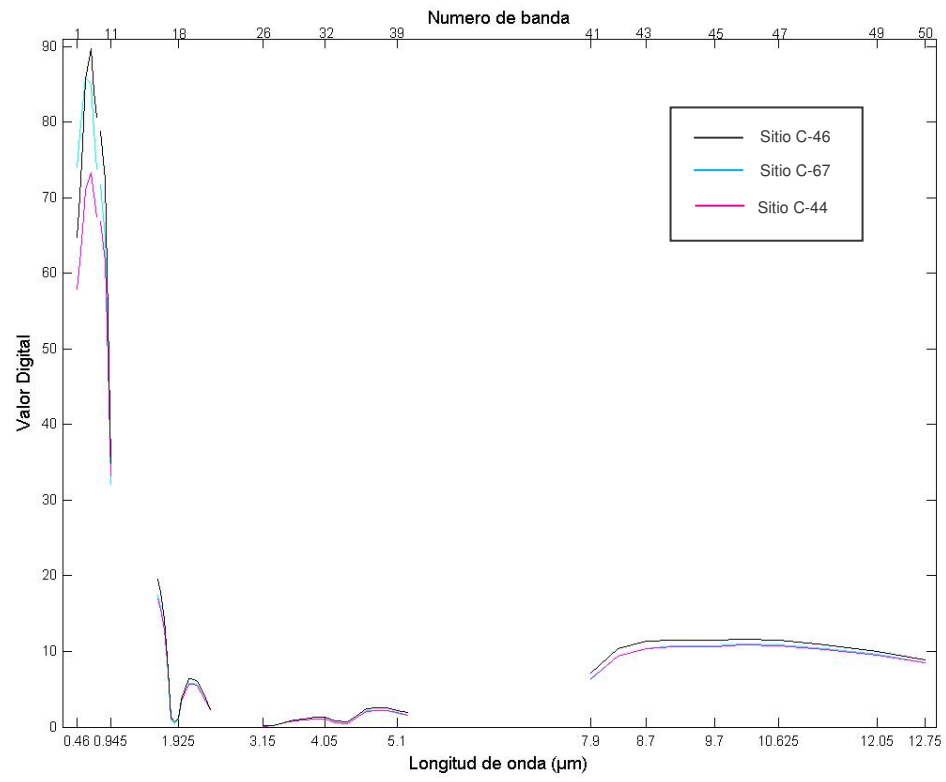


Figura 29. Firmas espectrales (AEC) de los sitios C-46, C-44 y C-67 del AEC; grupos espectrales: VNIR, SWIR, MID y TIR.

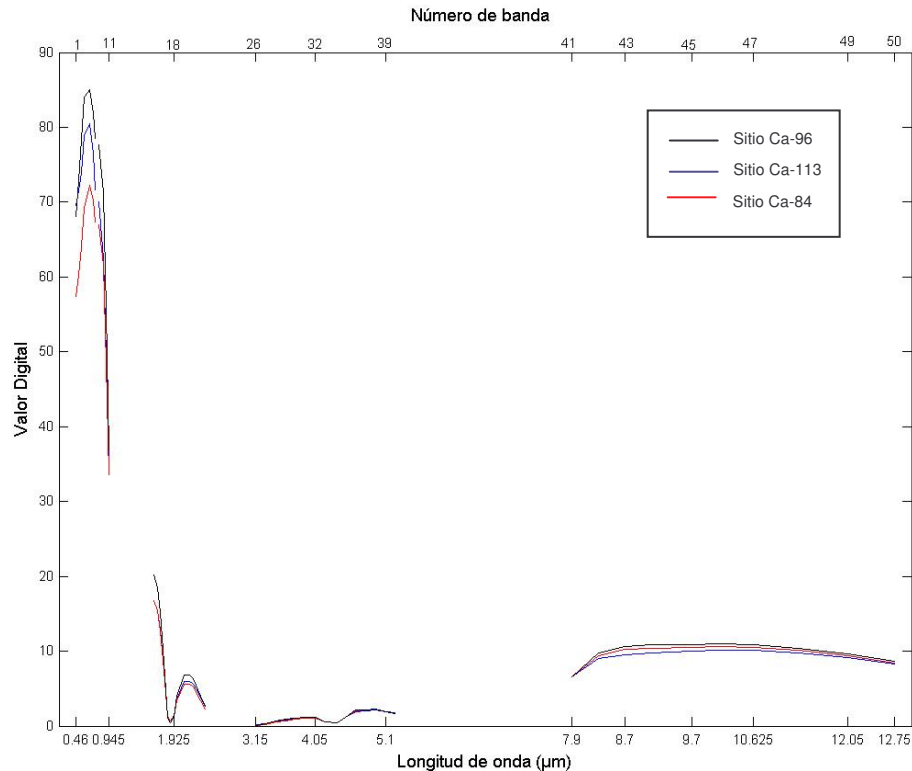


Figura 30. Firmas espectrales (ALC) de los sitios Ca-96, Ca-113 y Ca-84 del ALC; grupos espectrales: VNIR, SWIR, MID y TIR.

Las figuras 31, 32 y 33 muestran las mismas firmas espectrales anteriores, en este caso solamente se graficaron las regiones espectrales del visible, infrarrojo cercano (VNIR) e infrarrojo de onda corta (SWIR), ya que en estas regiones es donde se observa la mayor variabilidad mejorando así la visualización de las mismas al aumentar la escala en el eje de la longitud de onda.

La figura 31 muestra las firmas del AM en las primeros tres regiones espectrales, en ella podemos observar que el sitio M-36 presenta el valor más alto y que sobresale en

sus tres grupos de las demás firmas; el índice de contenido de roca (ICR) para este sitio es cercano a un 100% de lodo, generando un alto brillo a lo largo de toda la firma. Mientras que en los sitios M-17A y M-20 presentan firmas similares, la diferencia es que M-17A se eleva un poco más que M-20 en la región del Visible, debido a que la mayoría de las rocas de este sitio son de color claro (pobremente soldadas de colores rosas a anaranjados) y el segundo sitio está compuesto por rocas oscuras (lavas de color rojizo, negro gris oscuro y rojizo oscuro). En las regiones del VNIR y SWIR tienden a ser similares en estos sitios y en los 4 restantes.

Los valores medios de brillo los presentan los sitios M-21 y M-01, estos dos presentan firmas semejantes ya que en cada sitio se reportó un 50% de clastos de tobas vítreas y densamente soldadas.

Mientras que los valores más bajos de brillo los presentan los sitios M-08 y M-06, representados por una combinación de clastos de tobas vítreas de colores oscuros y tobas de colores claros y rocas oscuras compuestas de andesitas y basaltos de colores oscuros.

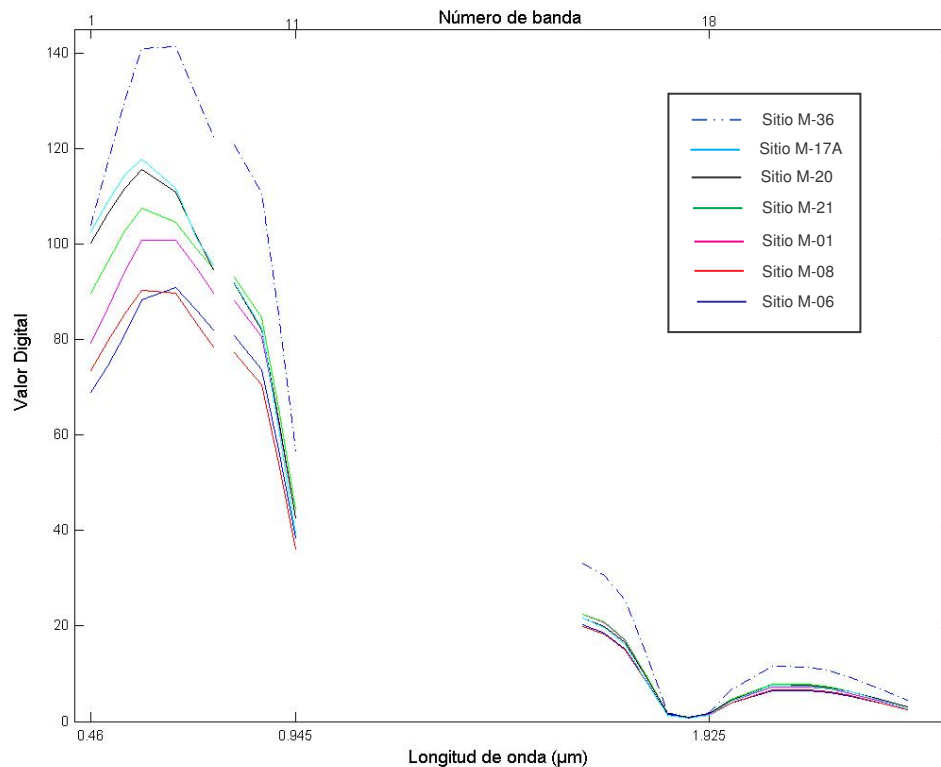


Figura 31. Firmas espectrales de los sitios M-36, M-17A, M-06, M-01, M-21, M-20 y M-08; grupos espectrales: VNIR y SWIR.

La figura 32 presenta las firmas espectrales del AEC para tres regiones espectrales (VNIR y SWIR). Al igual que las firmas del AM las firmas del Arroyo el Canelo presentan los cambios más significativos en la región del visible y van decreciendo en cambios en la región del Infrarojo cercano y al SWIR. El sitio C-46 presenta el valor más alto de las tres firmas. Este sitio está representado en su mayoría por clastos de tobas vítreas densamente soldadas con colores que varían de rosa a anaranjado.

La firma del sitio C-67, es similar a la anterior pero en este caso disminuye el valor de brillo, el sitio presenta un 50% de bioclastos y coquina. La firma correspondiente

al sitio C-44 tiene un valor digital más bajo de todas las firmas; en este sitio el porcentaje de tobas vítreas de colores claros es reducido en comparación al sitio C-46 con una proporción del 20% de clastos de rocas oscuras de composición andesita a basalto.

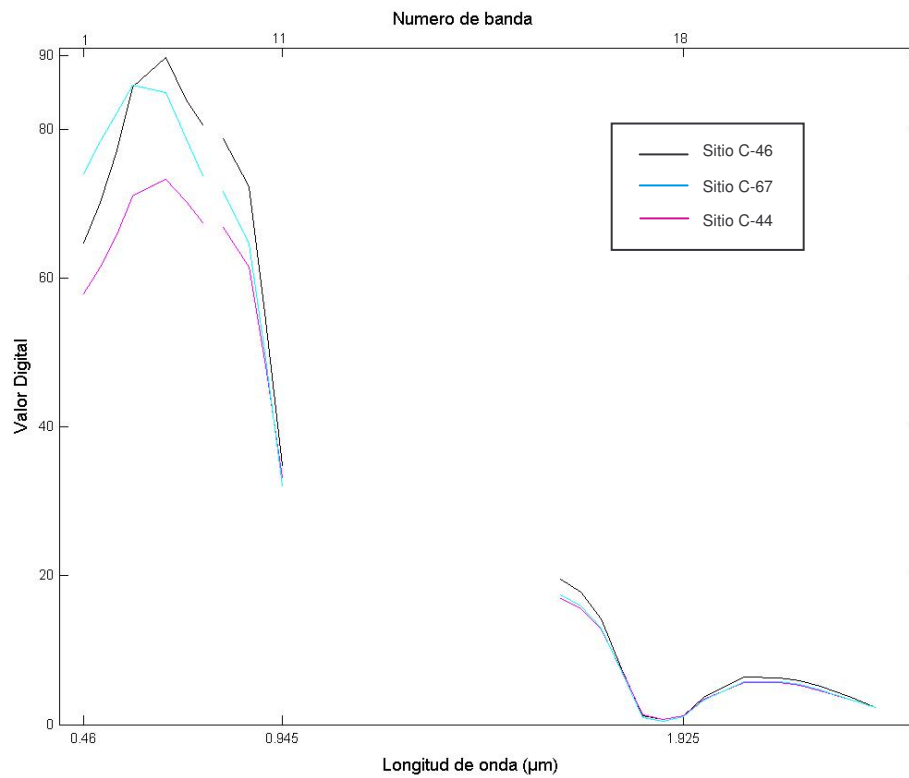


Figura 32. Firmas espectrales de los sitios C-46, C-44 y C-67 del AEC; grupos espectrales: VNIR y SWIR.

La figura 33 corresponde a las firmas del ALC, en los primeros tres grupos del espectro electromagnético (VNIR y SWIR). El valor más alto de brillo o valor digital esta en el sitio Ca-96 compuesto por un 55 % de tobas de colores claros y un 45% de tobas vítreas de colores un oscuros. El sitio Ca-113 tiene un valor de brillo menor que el anterior, y está compuesto de un 60% de tobas de colores claros y un 25% de tobas vítreas de colores un poco oscuros. El sitio que presenta el valor más bajo es el Ca-84, con proporciones similares en el ICR que la muestra anterior con un 60% de tobas de colores claros y un 25% de tobas vítreas de colores oscuros.

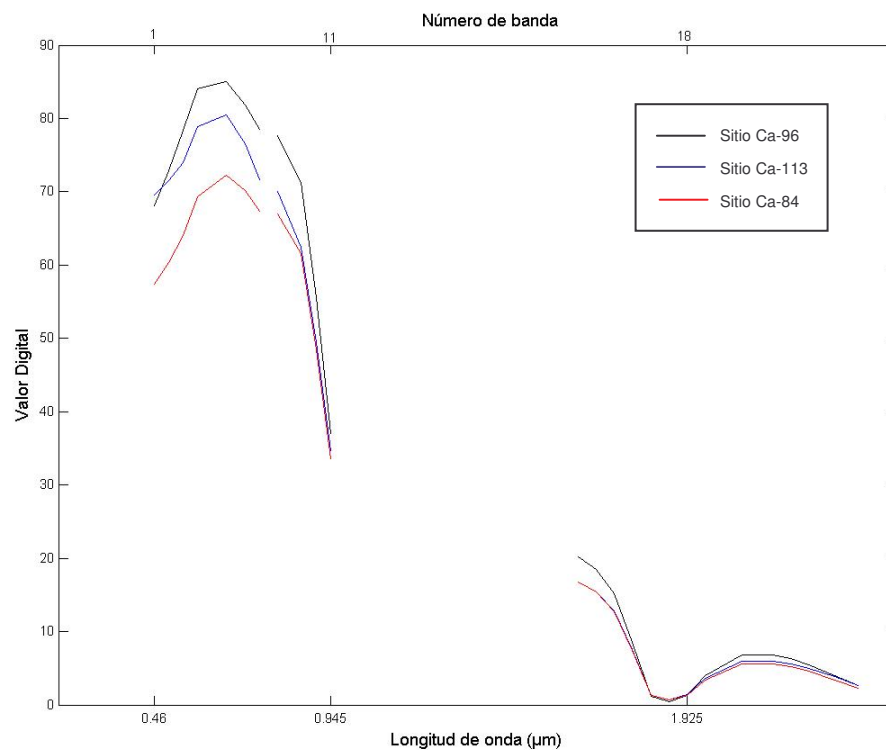


Figura 33. Firmas espectrales de los sitios Ca-113, Ca-84 y Ca-93 del ALC; grupos espectrales: VNIR y SWIR.

Los sitios que presentaron valores digitales más altos en cada arroyo están representados por los sitios: M-36 del AM, C-46 del AEC y Ca-96 del ALC. Los sitios C-46 y Ca-96 tienen en común un alto contenido de clastos del grupo V4 que esta compuesto de tobas vítreas pobremente soldadas, mientras que el sitio M-36 no presenta ninguna similitud ya que esta compuesto en su 100 % de lodo.

Por otro lado los sitios con valor digital mas bajo lo presentaron los sitios M-08 del AM, C-44 del AEC y Ca-84 del ALC. En el sitio M-08 los clastos predominantes son del grupo V4 (45 %) de tobas vítreas y la característica principal que diferencia a este arroyo del AEC y el ALC es que se presentan clastos de rocas de granito. Los sitios C-44 y Ca-84 son similares ya que contienen un porcentaje alto de clastos del grupo V2 de tobas vítreas densamente soldadas.

V. EFECTOS DEL HURACÁN NORA EN EL ABANICO ALUVIAL DEL ARROYO MATOMI.

En este capítulo se exploraron los efectos del huracán Nora (HN) en el Abanico aluvial de Arroyo Matomí (AAAM) a través de un análisis multitemporal de 3 imágenes Landsat, 2 anteriores al evento y una posterior a éste. Se procuró identificar las zonas afectadas por el flujo superficial que perturbó la exposición de los clastos en el cauce, induciendo cambios entre las imágenes antes y después del paso del Huracán Nora. Como se mencionó en el capítulo I, el barniz del desierto es una película que se desarrolla en la superficie de las rocas expuestas a la radiación solar en zonas desérticas; entre más tiempo permanezca el clasto sin movimiento, más oscura será su coloración en el espectro visible. Los clastos al ser volteados por alguna fuerza, en este caso el flujo superficial, inducen cambios en la superficie de exposición provocando cambios en la textura entre las imágenes antes y después del movimiento. En general, se perciben intensidades más claras en las zonas con mayor afectación.

Se utilizaron imágenes Landsat que cubren la zona cuyas coordenadas según el sistema mundial de referencia 2 para Landsat, WRS2 por sus siglas en inglés, son pase 38 renglón 39. Las fechas de éstas se indican en la Tabla I (Capítulo I). En las tres imágenes la condición de la vegetación es de sequía. La vegetación produce una débil señal predominando las rocas y el suelo. Las imágenes previas al HN de los años 1987 y 1988

corresponden a los meses de Julio y Abril, respectivamente. La imagen post Nora del 2001 corresponde también al mes de Abril.

Primeramente se realizó una fotointerpretación de las imágenes en compuestos en falso color para delimitar las zonas donde se perciben los cambios. Posteriormente se aplicó un análisis de componentes principales que nos permitió resaltar los cambios texturales causados por el HN en el año de 1997 en su paso a través del AAAM. Para el análisis multitemporal de las imágenes, se requiere que éstas coincidan espacialmente píxel a píxel, de lo contrario no se podría realizar un análisis correcto. Fue necesario referirlas a la misma ubicación cartográfica.

V.1. Fotointerpretación de los cambios entre las imágenes 1987 vs. 1988, 1988 vs. 2001.

A través de la fotointerpretación se hace una primera exploración de los cambios en la zona de estudio entre las imágenes tomadas en diferentes fechas. El objetivo es identificar los cambios en el AAAM debido al paso del meteoro Nora en el año de 1997. Primero entre dos imágenes previas al evento y luego entre una antes y otra después. Las imágenes previas al evento se muestran en figura 34, la asignación de bandas del sensor TM a los colores primarios rojo, verde y azul (RVA) fue 7,4 y 2. Entre las imágenes del año 1987 (34a) y 1988 (34b) no existe diferencia notables en los rasgos del abanico aluvial, esto se debe a que las dos imágenes tienen un año de diferencia en su toma, la condición de la vegetación es similar con una señal remanente en general y además no ocurrió algún fenómeno meteorológico importante que haya afectado la zona en ese lapso

por lo tanto, no existe discrepancia significativa entre ellas. En ambas se distingue claramente el trazo de la brecha que atraviesa el abanico aluvial. La zona de influencia del AM en el abanico es similar en ambas imágenes presentando una coloración más calara que su contexto.

Para el análisis comparativo pre (1988) y post Nora (2001) se utilizó de nuevo la combinación 7-4-2 en RVA respectivamente. En ellas (figuras 35a y 35b) se puede observar claramente algunos cambios en la textura de la superficie ocasionadas por el paso del meteoro.

La diferencia más notable entre estas dos imágenes es la carretera que atraviesa al abanico aluvial. En la figura 35a la brecha está claramente delineada, mientras que en la figura 35b, ésta se pierde en el tramo que pasa a través del abanico; cabe mencionar que en el tramo que pasa por el AM y el AEC se borra casi en su totalidad (Ver figura 35b – rectángulo de color rojo).

En la parte central de las imágenes, la carretera disecta dos terrazas de aluviones que desarrollaron barniz del desierto (recuadro azul en 35b); en la primera terraza, observando la imagen de Norte a Sur y comparando las dos imágenes, se observa que en la figura 35a la terraza sufrió erosión por la corriente del AEC, mientras que en la figura 35b la terraza no presenta tanta erosión como en la imagen de 2001 (figura 35b).

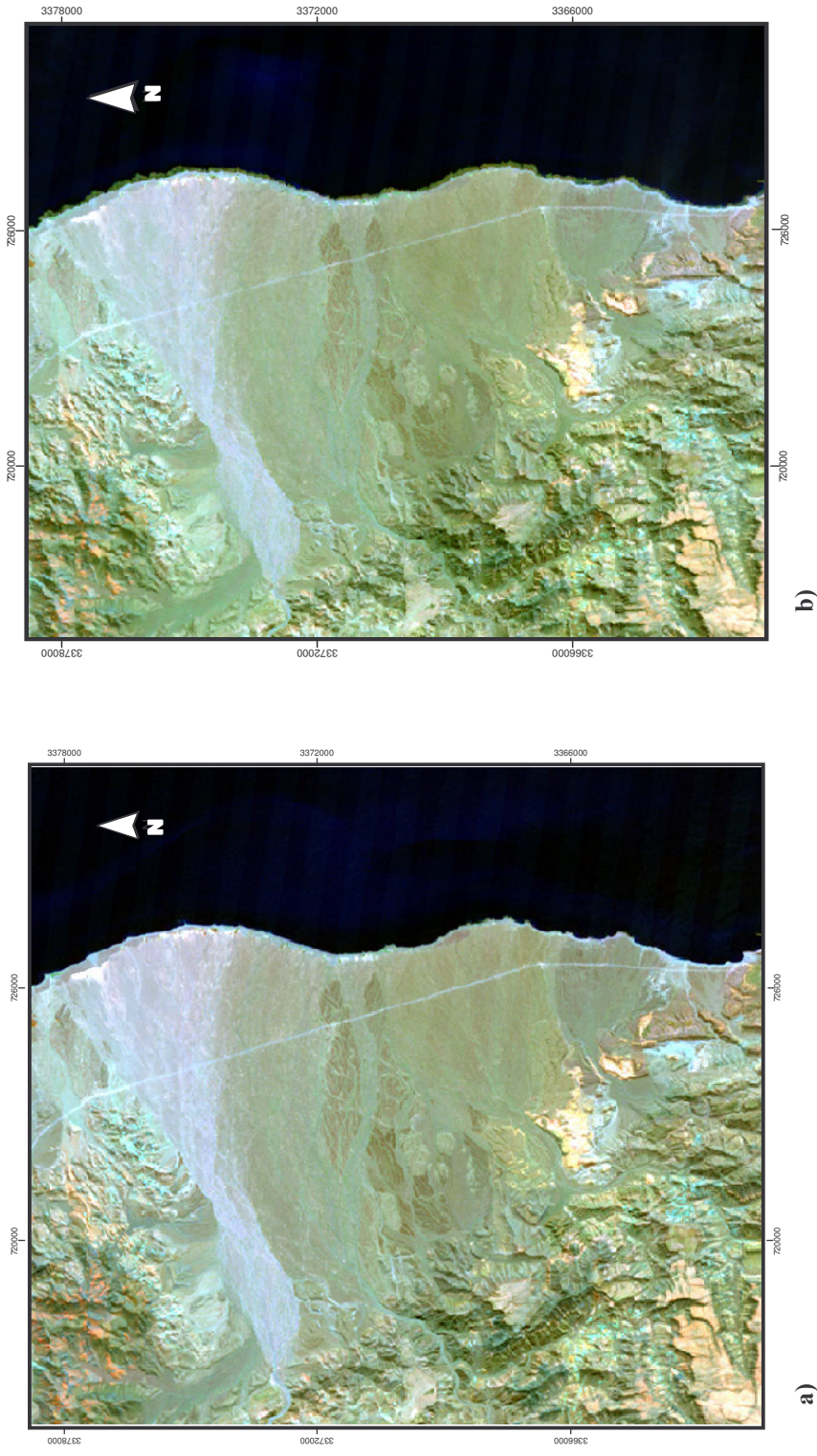


Figura 34.- Combinación de bandas 7-4-2 en compuestos a color RVA de dos imágenes LANDSAT TM del área de estudio tomadas antes del paso del HN 20/7/1987 (a) y 1/4/1988 (b).

En la parte sur de la imagen 35b (al sur de las terrazas antes mencionadas) se encuentra el ALC (cuadro color negro) cuyo cauce presenta un patrón trenzado más marcado que en la figura 35a, denotando que el arroyo condujo un gasto importante con su correspondiente efecto erosivo.

Al igual que el ALC, el AM en la figura 35b (cuadro color café) se observa la red de afluentes mucho más marcados que en la figura 35a.

Por último se percibe un crecimiento de las zonas que presentan colores claros (ver figura 35b – cuadro color rosa) del AM, comparando las dos figuras, en la figura 35b se puede observar que en la parte media del abanico del AM un incremento hacia el sur en las zonas claras en comparación con la imagen 35a, denotando una mayor zona de afectación por la magnitud del flujo superficial.

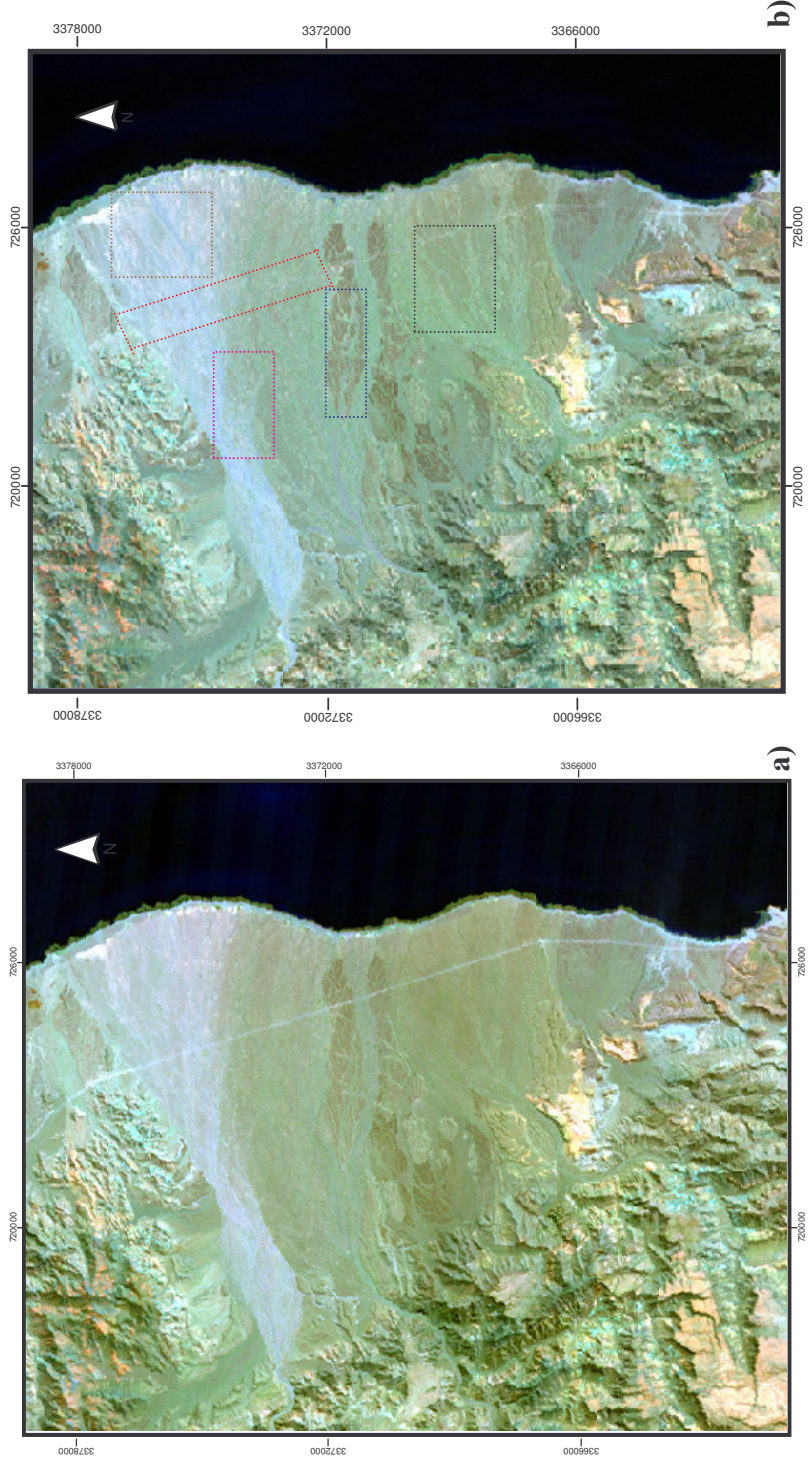


Figura 35. Combinación de bandas 7-4-2 en compuestos a color RVA de dos imágenes LANDSAT del área de estudio. La figura **a)** de 1988, es anterior al paso del HN en 1997. La figura **b)** imagen 2001 posterior a Nora, los cuadros enmarcan las zonas que muestran cambios en el área de estudio.

V.2. Análisis multitemporal por componentes principales (ACP).

En esta sección exploraremos una técnica para resaltar los cambios en las imágenes del AAAM antes y después del paso del HN. El análisis multitemporal por ACP consiste en aplicar la transformada TKL a pares de imágenes multiespectrales tomadas en diferentes tiempos asimilando conjuntos equivalentes de bandas espectrales de las imágenes fuente. Mediante ACP se obtiene una nueva imagen multiespectral resultante de la combinación lineal de las bandas originales (Prades et al, .2001). Se realizaron los dos procedimientos descritos en la sección de métodos; el estándar y el selectivo. La imagen asociada a la componente de cambio será la que nos resaltará mejor las diferencias entre los dos momentos de adquisición.

El objetivo es resaltar las discrepancias en las componentes resultantes a través de patrones predefinidos indicadores de cambio. Uno de éstos patrones en el ACP estándar, es identificar la componente de cambio, aquella que muestre una alteración en el signo de los vectores propios asociados a cada banda entre los tiempos (Recondo et al, 2001).

Se seleccionó un subconjunto de bandas para el análisis de las imágenes multitemporales LANDSAT, se eligieron 4 bandas de cada una de las imágenes 1987 vs. 1988 (87 vs. 88) y 5 bandas de cada una de las imágenes 1988 vs. 2001 (88 vs. 01) (Tabla IV).

Tabla IV. Bandas utilizadas para el ACP.

Imágenes Landsat	Bandas
TM 1987 vs. TM 1988	1, 2,3, 4
TM 1988 vs. ETM 2001	1, 2, 3, 4 y 7

V.2.1 Análisis Estándar de CP a imágenes multitemporales.

En el análisis de 87 vs. 88 se seleccionaron las bandas 1 a la 4 del sensor TM que abarcan la región visible e infrarojo cercano del espectro (VNIR), obteniendo 8 componentes principales (CP) por el método estándar. La Tabla V contiene los vectores propios (eigenvectores) del análisis 87 vs. 88. El 95.07% de la variabilidad en el conjunto de las 8 bandas está contenida en la primer componente principal (CP1) (Figura 36a), esto nos indica la contribución de información de todas las bandas utilizadas en el análisis; mientras que CP2 (Figura 37a) explica un 3.12% porcentaje de información. En las siguientes componentes principales (CP3, CP4, CP5, CP, CP7, CP8), va disminuyendo gradualmente el porcentaje de información o variabilidad.

Un aspecto importante en esta tabla es la observancia de los signos en los vectores propios de cada componente, las componentes indicadoras de cambio son aquellas donde existen signos opuestos para bandas equivalentes en los dos tiempos. Es atinado buscar este patrón en la segunda componente, ya que la primera se alinea con la variabilidad

global en todas las bandas, mientras que la segunda es la siguiente componente con mayor información donde pueden estar mejor resaltados los cambios. Como se puede observar el CP1 no muestra ningún cambio de signo en su vector propio, en todas sus bandas tiene signos positivos, mientras que en el CP2 muestra alternancia de signos en tres de las 4 bandas incorporadas en el análisis. Esta no es una señal contundente indicadora de cambio entre las dos imágenes con fechas de 1987 y 1988.

Tabla V. Vectores propios (eigenvectores) obtenidos de ACP para el par de imágenes 87 vs. 88.

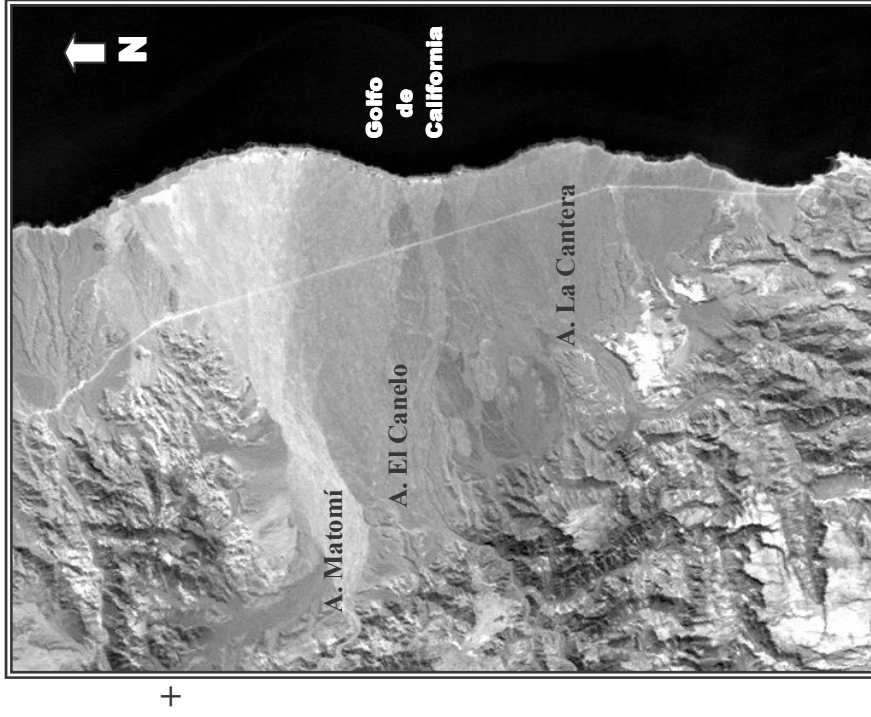
	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6	CP8	CP8
TM1 87	0.334	-0.69	-0.337	0.063	0.363	0.36	-0.168	0.077
TM2 87	0.356	0.25	0.38	-0.083	0.769	-0.261	-0.011	-0.005
TM3 87	0.358	-0.295	-0.165	-0.21	-0.176	-0.502	0.595	-0.276
TM4 87	0.36	0.204	0.284	-0.023	-0.133	0.693	0.5	0
TM1 88	0.363	0.083	-0.051	0.369	-0.256	-0.143	-0.154	0.783
TM2 88	0.353	-0.236	0.5	0.601	-0.336	-0.188	-0.243	-0.015
TM3 88	0.361	0.161	-0.038	-0.439	-0.223	0.108	-0.534	-0.551
TM4 88	0.342	0.495	-0.617	0.505	0.022	-0.052	0.004	-0.015
% Información	95.07	3.12	0.9	0.54	0.21	0.1	0.04	0.02

Para el análisis de 88 vs. 01, además de las bandas 1 a la 4 del sensor TM y ETM, se incorporó la banda 7 de la región del SWIR, obteniendo 10 componentes principales (CP). La tabla VI contiene los vectores propios resultantes del ACP para este par de imágenes. En este caso, el porcentaje de la variabilidad atribuida a la primer componente es de 92.87%, un porcentaje menor que en el caso de 87 vs. 88. Es interesante notar que CP2 (Figura 37b) representa el 4.48% de la variabilidad, un porcentaje mayor que en el caso 87 vs. 88. También es importante resaltar en CP2 el cambio de signo entre el par de imágenes, las bandas que corresponden a la imagen TM de 1988 presentan signos negativos en las cinco bandas, mientras que las bandas de la imagen ETM del 2001 presentan signos positivos.

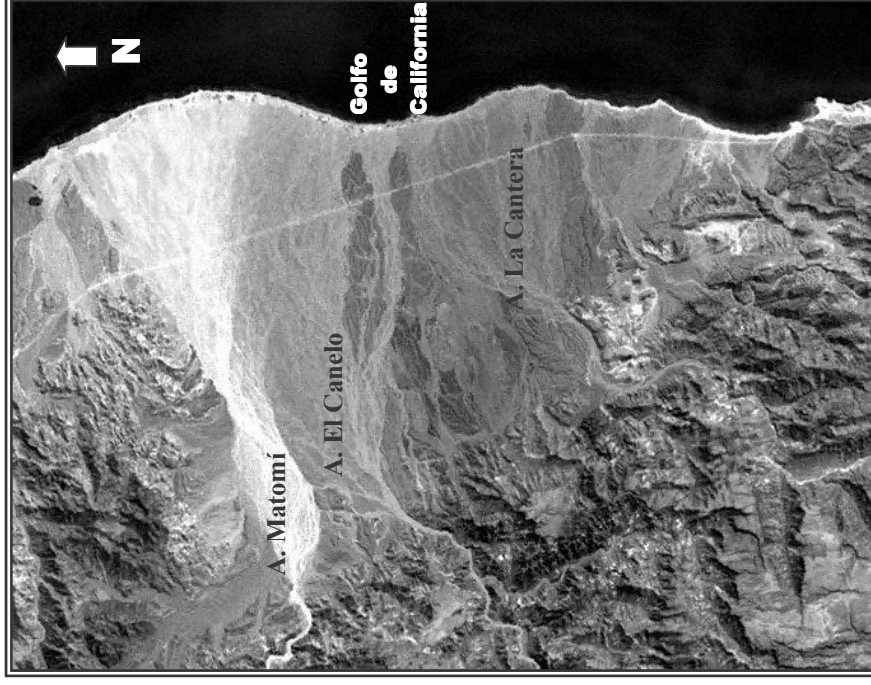
La imagen CP2 es la que mejor resalta los cambios que sufrió el abanico aluvial entre 1988 y 2001. La CP3 explica el 1.56% de la información y salvo la banda 7, todas las bandas alternan signo, lo que podría ser una segunda alternativa para visualizar la variabilidad entre las dos fechas.

Tabla VI. Eigenvectores obtenidos de ACP para el par de imágenes 88 vs. 01.

	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6	CP7	CP8	CP9	CP10
TM1/88	0.288	-0.69	0.259	- 0.0195	-0.033	0.517	0.169	0.198	0.006	-0.002
TM2/88	0.311	-0.291	-0.59	-0.168	-0.478	-0.223	-0.35	-0.063	0.192	0.013
TM3/88	0.316	-0.325	0.338	0.146	0.387	-0.45	-0.224	-0.463	0.059	-0.196
TM4/88	0.323	-0.083	-0.392	0.017	0.273	-0.251	0.468	0.094	-0.581	0.18
TM7/88	0.324	-0.088	0.251	0.361	-0.052	-0.148	-0.138	0.356	0.209	0.692
ETM1/01	0.324	0.174	-0.224	0.173	0.304	0.025	0.21	0.384	0.529	-0.47
ETM2/01	0.322	0.181	0.171	0.422	-0.374	0.144	-0.242	0.134	-0.491	-0.423
ETM3/01	0.321	0.246	-0.216	0.192	0.095	0.556	0.047	-0.612	0.105	0.216
ETM4/01	0.317	0.28	0.348	-0.356	-0.45	-0.234	0.507	-0.192	0.141	-0.051
ETM7/01	0.314	0.343	0.078	-0.641	0.316	0.105	-0.446	0.169	-0.164	-0.051
% Inform.	92.87	4.48	1.56	0.6	0.18	0.13	0.07	0.05	0.04	0.02

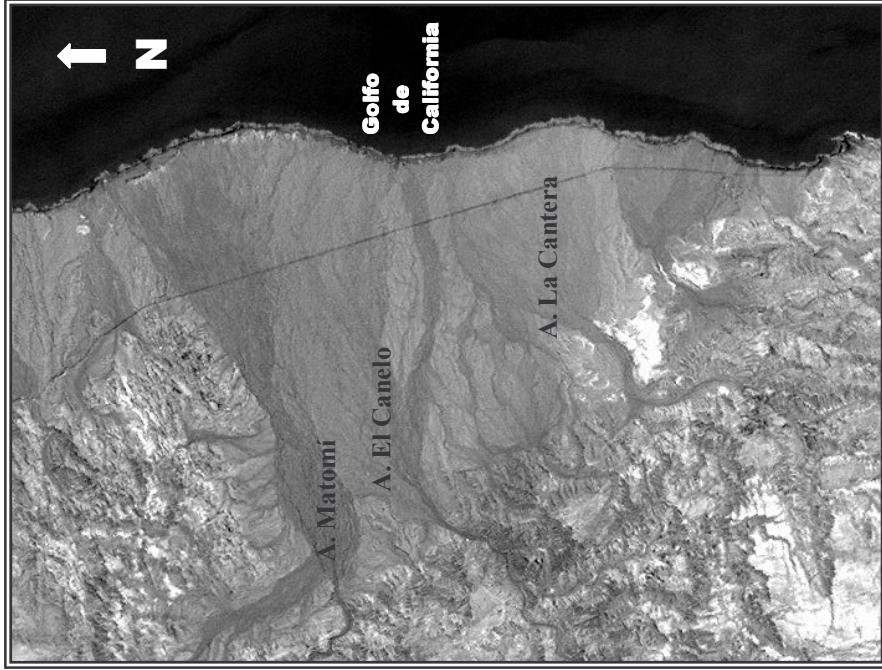


(a) CP1 87 vs. 88

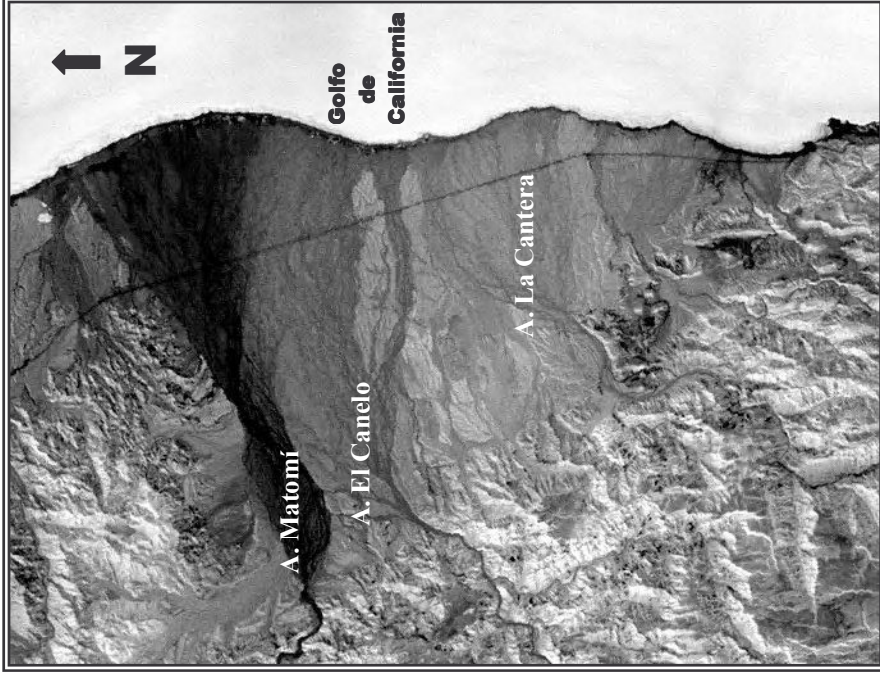


(b) CP1 87 vs. 01

Figura 36. (a) CP1; par de imágenes 87 vs. 88, esta imagen corresponde a la componente con el mayor porcentaje de información (95.07%). (b) Imagen de la primer componente del par de imágenes del 88 vs. 01. Representa un 92.87% de variabilidad en las imágenes utilizadas para el ACP. En ella podemos observar que el AM presenta el tono de gris más claro en toda la imagen, esto denota cambios relevantes en el arroyo.



(a) CP2 87 vs. 88



(b) CP2 87 vs. 01

Figura 37. (a) CP2; par de imágenes 87 vs. 88. La segunda componente denota los principales cambios en la zona; en esta imagen la zona del abanico aluvial no se observan muchos cambios ya que presenta tonos de grises uniformes en toda el área. (b) Imagen de CP2 del par de imágenes 87 vs. 88. En el área del abanico aluvial se observa que los tres arroyos presentan diferentes tonos de gris. El arroyo que presenta grandes cambios es: el AM, ya que presenta un tono de gris oscuro.

V.2.2 Análisis multitemporal por el método selectivo de ACP.

En este análisis solamente se utilizó el par de imágenes del 88 vs. 01, ya que el par del 87 y 88 no mostró cambios significativos mediante fotointerpretación de compuestos en falso color, ni por el método de ACP estándar. El análisis multitemporal por el método selectivo consiste en calcular las componentes principales sobre pares de bandas equivalentes de imágenes tomadas en dos tiempos. Se generan dos componentes, la CP1 representa la variabilidad común en ambas imágenes, mientras que CP2 registra la variabilidad en una pero ausente en la otra. Por lo tanto para la detección de cambios, la atención se enfoca sobre la segunda componente, donde se resaltarán las diferencias entre las dos fechas. El proceso se puede repetir tantas veces como bandas comunes existan (Recondo et al., 2001) y posteriormente se pueden generar compuestos en falso color con las CP2's resaltando así los cambios en color.

Al igual que en el método estándar, se utilizaron los 5 pares de bandas indicados en la tabla IV. Las bandas del sensor TM corresponden al año de 1988 y las del ETM al 2001. En la tabla VII se muestran los resultados del ACP mutitemporal, estos incluyen el coeficiente de correlación para cada par de bandas, porcentaje de la variabilidad asignado a CP1 y CP2, y los vectores propios (eigenvectores) de cada componente para los pares de bandas.

Como se puede observar en la tabla VII, el coeficiente de correlación más bajo es en el par de bandas TM1 y ETM1 presentando un coeficiente de 0.912 y un porcentaje de

variación de CP2 de 3.97%, denotando así que el par de bandas antes mencionado, es el que mejor puede realzar las diferencias entre 88 y 01.

El par de imágenes TM2 y ETM2 presentan un coeficiente de correlación del 0.928, ligeramente mayor al porcentaje del par de bandas TM1 – ETM1. Y su porcentaje de variación de CP2 del 1.97% (menor que el par de bandas anteriores). Entre menor sea la correlación entre el par de bandas, mayor será el porcentaje de variación explicado por la CP2.

Tabla VII. Datos obtenidos del método selectivo de ACP para los siguientes pares de bandas de los años 1988 y 2001, TM1-ETM1, TM2 – ETM2, TM3 – ETM3, TM4 – ETM4 y TM7 – ETM7. Las bandas TM corresponden a 1988 y las ETM a 2001.

Par de bandas TM vs. ETM 1988 vs. 2001	Coefficiente de correlación	% de Variación de CP1	% de Variación de CP2	Eigenectores CP1	Eigenectores CP2
TM1 – ETM1	0.912	96.03	3.97	(0.707, 0.707)	(0.707, -0.707)
TM2 – ETM2	0.928	98.03	1.97	(0.395, 0.919)	(-0.919, 0.395)
TM3 – ETM3	0.968	99.68	0.32	(0.521, 0.854)	(-0.854, 0.521)
TM4 – ETM4	0.973	99.73	0.27	(0.735, 0.678)	(0.678, -0.735)
TM7 – ETM7	0.974	99.74	0.26	(0.574, 0.819)	(-0.819, 0.574)

El par de bandas siguientes: TM3 – ETM3, TM4 – ETM4, TM7 – ETM7 presentan un coeficiente de correlación alto en comparación a los 2 primeros pares de bandas. El porcentaje de variación de CP2 para los tres pares de bandas es muy bajo (0.32%, 0.27%, 0.26%) por lo cual podemos decir que no son buenas componentes indicativas de cambio; ya que presentan valores altos en su coeficiente de correlación y valores bajos en el % de variación de CP2s. Otro aspecto interesante a resaltar como indicador de cambio es la alternancia de signos en los eigenvectores de las segundas componentes en los 5 pares de bandas. En la Figura 38 se muestran los CP1 para los 5 pares de bandas mencionados en la tabla VII.

A continuación se describirá brevemente cada imagen de la figura 38.

a) Esta imagen corresponde a CP1 para el par de bandas TM1 vs. ETM1, en ella podemos observar que el AM resalta en colores claros sobre los demás arroyos en el abanico, los afluentes que se encuentran dentro del delta del Matomí se encuentran marcados y los afluentes que se encuentran dentro de los deltas de AEC y ALC también se consideran resaltados, estos dos arroyos presentan un tono de gris más oscuro que el Matomí.

b) CP1 para el par de bandas TM2 vs. ETM2, en esta imagen el AM muestra un color gris brillante (menos brillante que en **a**); los afluentes que están dentro de su delta se observan resaltados pero con menor calidad que el anterior, al igual que el anterior, es el mismo caso para los demás arroyos del abanico aluvial, los cuales presentan tonos de gris menos brillante y claros con el Matomí, y sus afluentes no aparecen tan resaltados.

En los siguientes incisos: **c)**, **d)** y **e)**, observamos que las características de los arroyos (brillo y afluentes marcados) van decreciendo en nitidez; en el inciso **c)** el AM aún presenta un color gris brillante pero en menor proporción que en **a)** y **b)**.

Las imágenes de los incisos **d)** y **e)** son peculiares ya que el área que engloba al abanico aluvial presenta uniformidad (el tono de gris se observa difuminado en toda el área) en el tono de gris, el AM se destaca por presentar un tono un poco más brillante que el que se observa en el resto del área y los afluentes de cada arroyo no se observan muy marcados en esta imagen.

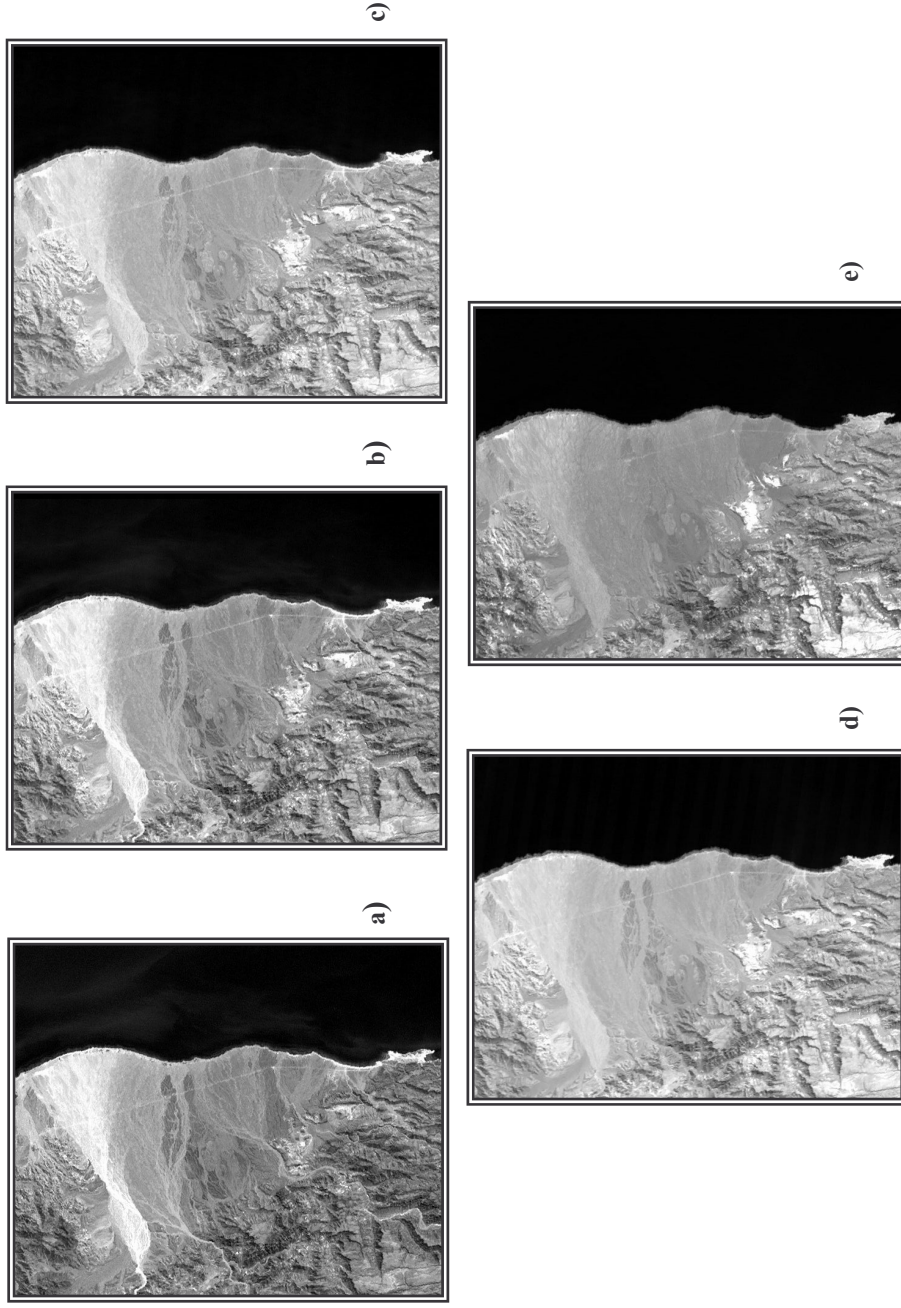


Figura 38. **a)** Imagen de CP1 del par de bandas TM1 vs. ETM1 (88 vs. 01). **b)** Imagen de CP1 del par de bandas TM2 vs. ETM2 (88 vs. 01). **c)** Imagen de CP1 del par de bandas TM3 vs. ETM3 (88 vs. 01). **d)** CP1 del par de bandas TM4 vs. ETM4 (88 vs. 01). **e)** CP1 del par de bandas TM7 vs. ETM7 (88 vs. 01).

En la Figura 39 se muestran las CP2 resultantes de los pares de bandas indicadas en la tabla VII.

Los dos primeros pares de bandas multitemporales (TM1 vs. ETM1, TM2 vs. ETM2) que corresponden a las bandas azul y verde del espectro, presentan mayor porcentaje en la variación, por lo cual se refleja en las imágenes a) y b) de la figura 39.

En las imágenes podemos observar que las zonas que presentan tonos oscuros de gris (AM) indican zonas de cambio de textura entre las dos fechas, como se puede observar en las 2 primeras CP2 (Figura 39 **a)** y **b)**); mientras que las zonas que presentan tonos claros como se observa en las imágenes en las zonas rocosas de la sierra (parte noroeste y suroeste), los tonos brillantes se atribuyen a zonas donde no existe cambios significativos. Lo anterior se puede corroborar con el método selectivo, la CP2 que arrojó el método selectivo proporcionó colores oscuros para zonas de cambio y tonos de gris claro para zonas donde no existen cambios significativos (Figura 39).

Las imágenes **c)**, **d)** y **e)** de la figura 39, representan valores bajos en el porcentaje de variación de CP2 (ver Tabla VII), esto indica que no existe variabilidad significativa en el área y podemos observar que la red entrecruzada de los arroyos que atraviesa el abanico aluvial no se ve resaltada, no presenta contraste en los tonos de gris del abanico.

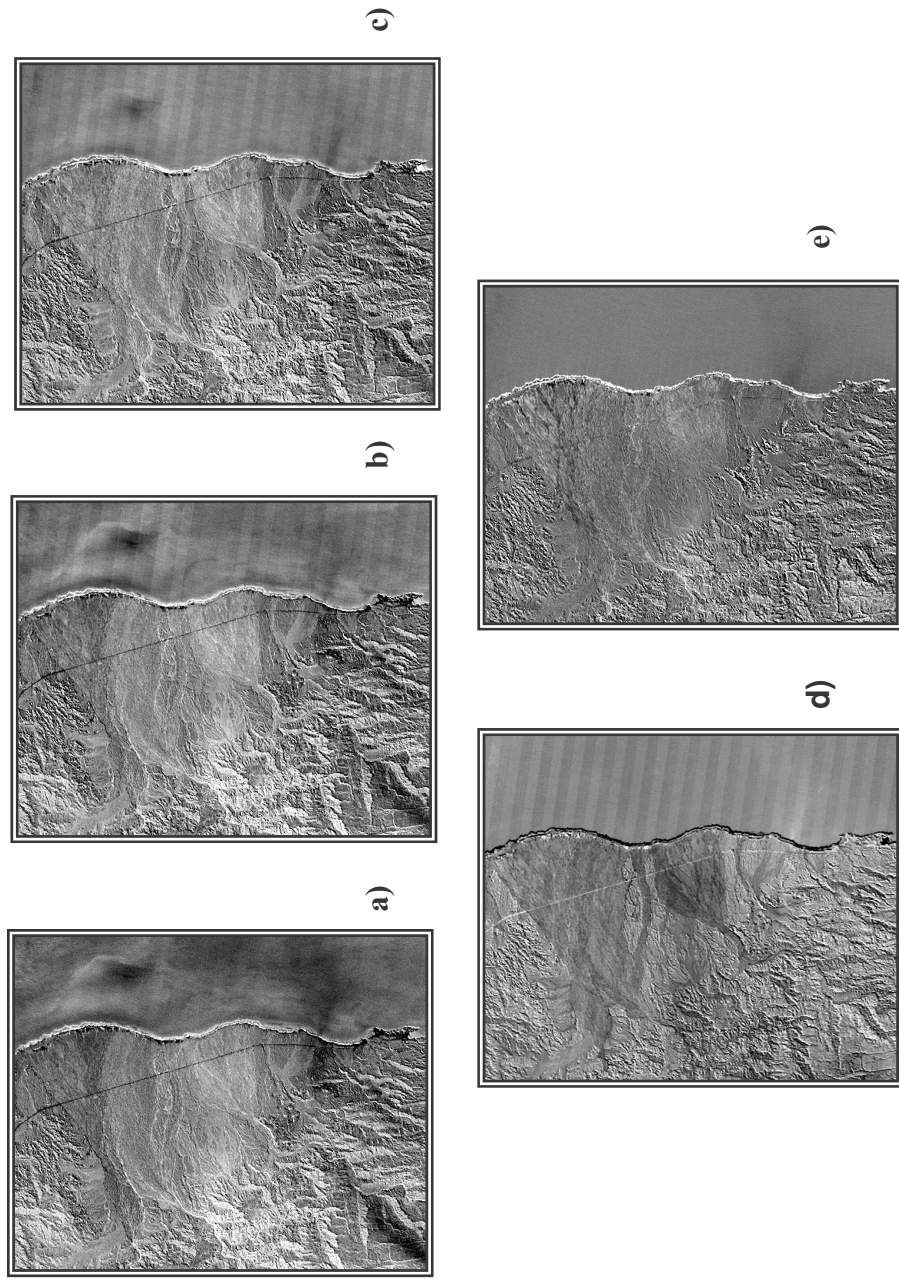


Figura 39. CP2 de pares de bandas de imágenes del 1988(TM) vs. 2001(ETM). **a)** Imagen de CP2 del par de bandas TM1 vs. ETM1. **b)** Imagen de CP2 del par de bandas TM2 vs. ETM2. **c)** Imagen de CP2 del par de bandas TM3 vs. ETM3. **d)** CP2 del par de bandas TM4 vs. ETM4. **e)** CP2 del par de bandas TM7 vs. ETM7.

VI. DISCUSION.

Se realizaron tres análisis al AAAM a partir de imágenes MÁSTER, ASTER, LANDSAT TM y ETM, el primero fue una fotointerpretación geomorfológica del abanico con la extracción de la red hidrológica, seguido de un análisis litológico en zonas muestreadas en campo y asociando a los sitios sus respectivas firmas espectrales en el sensor MÁSTER. Por último se estimaron los efectos que sufrió el abanico debido al paso del HN. Para ello se hizo un análisis multitemporal de imágenes LANDSAT antes y después del meteoro.

VI.1. Análisis litológico.

El análisis litológico se realizó visualizando el mosaico de imágenes MÁSTER, diferenciando las zonas que presentaban distintas tonalidades en la superficie, identificando así los sitios a muestrear en campo. Sobre el AM se identificaron 25 sitios de los cuales se discriminaron aquellos que presentaran información redundante, muestreando solo en 16 sitios. En el AEC se visitaron 14 sitios, de los cuales se muestrearon solamente 8 y por último, en el ALC se visitaron 9 y se muestrearon cuatro. Con el análisis de los clastos en los sitios muestreados, se realizó una clasificación en base a los patrones de ocurrencia de éstos, identificando 5 grupos representativos.

A diferencia de otros autores que han realizado análisis litológicos en la región, a través de sensores remotos para crear mapas temáticos del área (Dmochowski, 2005;

Stock et al, 1992; Noyola-Medrano et al., 2005), en este trabajo se obtuvieron los datos de campo para calcular índices de clastos y así compararlos con sus firmas espectrales en el sensor MÁSTER.

En cuanto a las firmas espectrales obtenidas en el AAAM en las ventanas espectrales del sensor MÁSTER, todos los sitios presentan una forma similar en las curvas, en particular en los intervalos del MID (Infrarrojo Medio) ($3.1 \mu\text{m} - 6.1 \mu\text{m}$) y TIR (Infrarrojo térmico) ($6.1 \mu\text{m} - 15.5 \mu\text{m}$), las firmas son muy cercanas unas a otras, por lo tanto se optó por eliminar estos intervalos y graficar solamente los del Visible al Infrarrojo Cercano VNIR ($0.4 \mu\text{m} - 1.1 \mu\text{m}$) y el de infrarrojo de onda corta SWIR ($1.1 \mu\text{m} - 3.1 \mu\text{m}$), aumentando así la escala en el eje de la longitud de onda λ . Se hizo la comparación de las firmas de cada arroyo y se encontró que primordialmente cambian en la región VNIR del espectro. Se pudo correlacionar algunas de las diferencias en la forma de las firmas con el contenido de clastos de los sitios. El valor digital más alto encontrado en todas las firmas se relaciona a la presencia de lodo en el sitio M-36, por otra parte el valor digital más bajo se presenta en sitios donde se encontró en su mayoría tobas vítreas de colores claros del grupo V2 y tobas vítreas de ceniza del grupo V4 con cubierta en su superficie de barniz del desierto (sitio M-06).

La forma de las curvas en las firmas espectrales es similar para todos los sitios, creemos que esto se debe a que el abanico es una zona donde se vierten los sedimentos arrastrados de las partes altas de la cuenca por las corrientes superficiales y que la mezcla de clastos es similar a lo largo del abanico, efectuándose una clasificación mecánica del tamaño, con los mas grandes cerca del ápice topográfico y los más pequeños en la base

del abanico. Otros autores han obtenido firmas de la región pero en su caso los sitios contenían rocas de una sola composición (Noyola-Medrano, 1999, Dmochowski, 2005). Las firmas espectrales no se compararon numéricamente con las firmas de las bibliotecas espectrales (NASA, 1999), debido a que los valores obtenidos de las imágenes MÁSTER en los sitios muestreados presentan valores digitales (valor de píxel) y no fueron transformados a reflectancia como los manejan las firmas espectrales de las bibliotecas, sin embargo la forma de éstas si es comparable. Los picos y valles, que representan regiones de reflexión y absorción respectivamente, serán comunes para materiales de composición similar.

VI.1. Efectos del Huracán Nora.

Los efectos del HN sobre el AAAM se estimaron a través del análisis multimtemporal de imágenes LANDSAT aplicando tres técnicas, una de ellas fue la fotointerpretación de imágenes en compuestos de falso color y las otras dos se basaron en el análisis de componentes principales ACP, uno del tipo estándar y el otro selectivo (Richards, 1993; Noyola-Medrano et al., 2005). Para la fotointerpretación se utilizaron tres imágenes analizadas en pares (Tabla IV), el primer par corresponde a los años 1987 y 1988 (figura 34) y no se percibieron diferencias notables en los rasgos del abanico aluvial, esto se debe a que tiene un año de diferencia en su toma y además no ocurrió ningún fenómeno meteorológico importante que haya afectado la zona en ese lapso. Por otra parte, en la fotointerpretación del par de imágenes de los años 1988 y 2001 (figura

35), se perciben claramente los efectos del HN. En la imagen de 1988 se observa claramente la carretera 5 que disecta al abanico y en la imagen 2001 se desvanece, debido al gran escurrimiento a través de todo el abanico, generado durante el HN, provocando entre otras cosas la erosión de la carretera.

El análisis estándar de componentes principales (CP) se aplicó por pares sobre las imágenes multitemporales, primero sobre una combinación de las bandas del par de imágenes de 1987 y 1988, y posteriormente sobre el par de 1988 y 2001. Para la detección de cambios con esta técnica, se buscan aquellos componentes donde ocurra un cambio de signo en los vectores propios (eigenvectores) entre las bandas correspondientes en los dos tiempos de análisis. El CP1 se alinea con un eje orientado hacia la mayor variabilidad presente en el conjunto de todas las bandas. El CP1 para el par de imágenes 1987 vs 1988 (figura 36a) presenta una gama de grises, que no muestra ninguna diferencia, al igual que el par de imágenes 1988 Vs 2001 (figura 36b). Mientras que el CP2 muestra más diferencias que los anteriores, El CP2 se reporta en la literatura (Recondo et al, 2001) como la componente indicativa de cambio, tal vez por ello el CP2 del método selectivo muestra más cambios que el CP1. El CP2 del par de imágenes del 87 Vs 88 (figura 37a) tonos de grises uniformes, esto tal vez indica ningún cambio en la zona, mientras que las imágenes del 88 Vs 01 (figura 37b), muestran en la zona del AM un color gris oscuro a negro, mientras que el AEC y ELC presentan tonos de grises más claros. Tal vez esto nos indique que el AM fue el arroyo que sufrió más cambios en su delta, tal vez porque tuvo más aporte de agua que los otros.

En el análisis selectivo de CP solamente se aplicó sobre el par de imágenes 1988 y 2001; las imágenes 87 Vs 88 se eliminaron en este análisis debido a como se menciona en el análisis de fotointerpretación y estándar, este par de imágenes no mostraron diferencias algunas en la zona. En el análisis se obtuvieron el CP1 y CP2; CP1 por tener casi la totalidad de información de las bandas y CP2 porque es la componente indicativa de cambio (Recondo et al, 2001), CP1 mostró tonalidades de grises claras para los sitios con más cambios tal es el caso del AM que fue el arroyo más resaltado (figura 38). Por el contrario CP2 presentó tonos de grises oscuros para las zonas indicativas de cambios. El par de bandas TM1 – ETM1 y ETM2 – TM2 presentaron porcentajes de variación más altos que las demás bandas por lo tanto estas realzan más cambios en la zona. TM1 – ETM1 (figura 39a) presentó el valor más alto de variación, por lo que nos indica más cambios en la zona. En la literatura (USGS, 2004) la banda 1 se utiliza para resaltar las diferencias del suelo, si existe intemperismo y/o el grado de erosión y vegetación en la zona. Las tonalidades de gris que presentó el CP2 de TM1 – ETM1, fueron más oscuras en las zonas de cambios (zona del AM); como se dijo en el análisis anterior, esto tal vez se debe a que fluye más agua por el AM debido a que tiene una cuenca de drenaje más grande que los otros dos arroyos.

Un abanico aluvial tiene un ápice topográfico (AT) y uno hidrológico (AH), siendo el primero el punto más elevado del abanico y el segundo se sitúa donde existe evidencia física de bifurcación (FEMA, 1989). Pueden ser coincidentes como es el caso del AM. En las imágenes MÁSTER que son las que presentaron más resolución, las zonas

que presentaban evidencia física de bifurcación de los arroyos se marcaron con cuadros blancos, esto se puede observar en la figura 18.

Con la combinación de RVA 23- 9 -2 se obtuvo la mejor visualización de la red de drenaje que poseen los tres arroyos en el abanico aluvial, con la imagen resultante del abanico se puede describir que el tipo de drenaje corresponde al “drenaje entrelazado”, las formas se componen de una red de cauces poco profundos, se desarrollan en llanuras o terrazas aluviales compuestas de materiales gruesos y permeables, tal como lo cita Edward, (1999).

En el análisis geomorfológico, el abanico se dividió en tres formas geomorfológicas. La primera se nombró como piedemonte alto, esto se debe a que la zona es adyacente a las colinas y montañas (Sierra San Fermín y Sierra Santa Isabel), en campo se observó que en las partes altas del abanico se encontraban zonas con laderas cóncavas y convexas, algunas de las zonas convexas presentaban en su superficie clastos con desarrollo de barniz del desierto; además esta zona presentaba clastos de tamaños medianos y grandes con formas angulosas y subangulosas, indicativo de zonas proximales a la fuente. El piedemonte bajo comprendió las partes más alejadas a las montañas y colinas que constituyen la planicie aluvial de relieve poco ondulado y pendientes muy suaves. También comprende las terrazas que constituyen partes mas elevadas sobre el nivel base de erosión en depósitos aluviales más antiguos. La zona de playa no presenta ningún relieve en la zona y constituye una superficie plana formada por sedimentos de grano muy fino no consolidados, incluye clastos de tamaño arcilla, limo y arena de grano medio a muy fino y clastos de grava (centimétricos) con forma redondeada.

Y por ultimo la sierra baja, como la define García-Puga (2000), con alturas que varían desde 300 a 500 metros con pendientes abruptas. Esta zona está representada por las sierras adyacentes a la zona de estudio. Sierra San Fermín y Sierra Santa Isabel.

CONCLUSIONES.

Los riesgos a inundación en el Noroeste de México son subestimados debido a la condición desértica y escasez de lluvia. En el año de 1997 el Huracán Nora pasó a través del abanico causando cambios sobre este. Con los análisis litológico, espectral, fotointerpretación, componentes principales y geomorfológico de este trabajo se llegaron a las siguientes conclusiones:

- El abanico aluvial es la única fuente de abastecimiento de agua para la zona.
- El patrón de drenaje entrecruzado denota un ambiente sujeto a cambios repentinos de depositación, erosión e inundación.
- Toda la superficie del abanico representa riesgos potenciales a inundación, depositación y exhumado de sedimentos, siendo un sitio peligroso donde construir.

- La alteración en el barniz del desierto es un indicativo de cambio en el análisis multitemporal.
- La presencia de terrazas exhumadas con desarrollo de barniz del desierto en medio de las dos cuencas del abanico aluvial denotan poca persistencia de los procesos erosivos.
- En el análisis de componentes principales el método selectivo fue el que presento mejores resultados, en particular en las bandas 1 y 2 de Landsat TM y ETM.
- Las firmas espectrales son semejantes entre si debido a que el abanico es una mezcla de clastos.
- En las firmas espectrales los cambios mas notables se dieron en la región del visible, infrarojo cercano y en el infrarojo de onda corta.

LITERATURA CITADA.

- Antezana, H. 2000. Levantamiento de suelos a Nivel Semidetallado en la Zona Norte de Quillacollo y Vinto. Universidad de Bolivia. Reporte técnico. 25 p.
- Amelibia, I. 1999: Comparación de métodos de análisis multitemporal de detección de cambios en la comarca agraria V, utilizando imágenes multiespectrales, orientada a apoyar la actualización de los Mapas de Cultivos y Aprovechamientos de Navarra a escala 1:250,000. Trabajo fin de carrera. Dpto. de Proyectos e Ingeniería Rural. Universidad Pública de Navarra. 22 p.
- Baldor, A. 1966, Algebra: Madrid, España, Editorial Mediterráneo, 576 p.
- Barnes, W. L., Pagano, T. S., Salomonson, V. V. 1998. Prelaunch characteristics of the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) on EOS-AM1. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions.* 36 (4): 1088-1100.
- Bajcsy P. Groves P., 2004 “Methodology for Hyperspectral Band Selection”. *Magazine of Photogrammetric Engineering & Remote Sensing.* 70 (7): 793-802.
- Bischof, H., 1998. *Pyramidal Neural Networks*, Lawrence Erlbaum Associates, New Jersey. 192 p.
- BOSTON GEOMATICA. 1995. Ficha técnica resumida: LANDSAT 5 TM. <http://www.bgeo.com.py/landsat5.html>. Consulta: Enero de 2005.
- Bowers, T. L., Rowan, L.C. 1996. “Remote mineralogic and lithologic mapping of the Ice River Alkaline Complex, British Columbia, Canada, using AVIRIS data. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 62(12): 1379-1385 p.
- Campbell, J.B. 1996. “Introduction to remote sensing”. Guilford Press. New York. 622 p.
- CETENAL. 1977. “H11B67 Bahía Santa María”. Carta Geológica y Topográfica.
- CETENAL. 1977. “H11B77 Puertecitos”. Carta Geológica y Topográfica.
- Chavez, P. S. J., Kwarteng, A. Y. 1989. “Extracting spectral contrast in Landsat Thematic Mapper image data using selective principal component analysis”. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing.* 339-348 p.

- Chuvieco E. 1996: Fundamentos de teledetección especial (30 ed. Revisada). Ediciones Rialp, S.A. Madrid. 42 p.
- Clark, S. P. J. 1957. "Absorption spectra of some silicates in the visible and near infrared." *American Mineralogist* 42: 732-742 p.
- CNA, 2004. Comisión Nacional del agua.
http://www.cna.gob.mx/publica/estaticas/PDF/Cap2_contexto_gral.pdf. Consulta: Diciembre de 2003.
- Cooke, R.U., Warren, A. 1973. *Geomorphology in deserts*. London: B.T. Batsford Ltd., p. 120
- Djamel, T. 2000. Introducción a la teledetección aplicada al medio urbano.
<http://membres.lycos.fr/teledetec/>. Consulta: Noviembre de 2003.
- Dmochowski, J. E. 2005. "Application of MODIS – ASTER (Master) Simulator Data to Geological Mapping of Young Volcanic Regions in Baja California, Mexico". PhD Thesis, California Institute of Technology. 255 p.
- Dokka, R.K., y Merriam, R.H. (1982). "Late Cenozoic extension of northeastern Baja California, Mexico." *Geological Society of America Bulletin* 93: 371 -378p.
- Dorn, R.I., y T.M. Oberlander. 1981. "Microbial Origin of Desert Varnish." *Science*. 213: 1245-1247.
- Dorn, R.I. y T.M. Oberlander. 1982. "Rock Varnish." *Progress In Physical Geography*. 6: 317-367.
- Edusat. 2004. Programa de formación integral para el conocimiento, instalación, uso y mantenimiento de la red edusat.
<http://dgtve.sep.gob.mx/tve/asistencia/manuales/pdf/glosario.pdf>. Consulta: Febrero de 2004.
- Edward, J. Tarbuck 1999. *Ciencias de la Tierra. Una introducción a la Geología Física*. Prentice Hall. Madrid. 58 p.
- ENGESAT. 2000. Ficha técnica de ASTER.
<http://www.engesat.com.br/satelites/aster1.htm>. Consulta: Abril de 2004.

- Farfán y Zehnder 2001. An Analisis of the landfall of Hurricane Nora (1997). American Meteorological Society. 29 (8): 2073-2088.
- FEMA 1989. "Alluvial Fans: Hazards and Management". Federal Insurance Administration Office of Loss Reduction. Reporte geológico. 56 p.
- Fletcher, J., Martín-Barajas, A., Skerl, L. 1997. Estudio geológico estructural de la zona San Luis Gonzaga, Baja California. Informe ejecutivo. Residencia general de Cerro Prieto. Comisión Federal de Electricidad. 24 p.
- García-Puga, J. 2000. Geomorfología e hidrología superficial entre Puertecitos y San Luis Gonzaga, Baja California, apoyados en sensores remotos y modelos digitales de elevación. Tesis de Maestría, CICESE. 101 p.
- García-Varela, A. 2000. Sensor LANDSAT. Sistemas de comunicación vía satélite. <http://www.com.uvigo.es/asignaturas/SCVS/trabajos/curso0001/biblio/LANDSAT/LANDSAT.pdf>. Consulta: Febrero de 2004.
- Gastil, R. G., Phillips, R.P., y Allison, E.C. 1975. Reconnaissance Geology of the state of Baja California: G.S.A. Memoir. 140 p.
- Goetz, A. F. H., Vane, G., Solomon, J.E., and Rock, B.N. 1985. "Imaging spectrometry for earth remote sensing." Science 228(4704): 1147-1153 p.
- Gonzalez, R., Woods R. 1987. "Digital image processing". Reading, Massachusetts, Addison-Wesley Publishing Company. 230 p.
- Gupta, R.P. 1991. "Remote sensing geology". Springer-Verlag. Berlin. 356 pp.
- Hernández-Alvarez, F. 1995. "Estudio litológico de la zona de el volcán de Colima". VII simposio Latinoamericano de Percepción Remota, Puerto Vallarta, Noviembre 1995. 402-413 p.
- Hinojosa-Corona. A., 2001 "Caracterización de los recursos naturales en la zona costeras de Puertecitos – San Luis Gonzaga, Baja California, apoyados en imágenes multiespectrales de alta resolución". Informe técnico final. CICESE. 16 p.
- Hook, S.J., J.J. Myers, K.J. Thome, M. Fitzgerald and A.B. Kahle, (2001). The MODIS/ASTER airborne Simulator (MASTER)- a new instrument for earth Science studies, Remote Sensing of Enviroment, 76: 93-102 p.
- Hunt, G. R. 1977. "Spectral signatures of particulate minerals in the visible and near infrared." Geophysics 42(3): 501-513 p

- IAFE, 2000. Teledetección con Imágenes Satelitales. Grupo de Teledetección IAFE. <http://membres.lycos.fr/teledetec/paginas/Pagina2.htm>. Consulta: Febrero de 2004.
- INEGI 1995. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. Cuencas Hidrológicas de México. <http://www.inegi.gob.mx>. Consulta: Septiembre de 2005.
- Jansma, P.E., y Lang, H.R. 1996. "Applications of spectral stratigraphy tu Uper Cretaceous and Tertiary rocks in southern Mexico: Tertiary graben control on volcanism". Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. 62: 1371-1378 p.
- Jensen, J. R. 1996. Introductory digital image processing. A remote sensing perspective (20 ed.). Prentice Hall, Upper Saddle River N.J. 315 p.
- King, M .D., Menzel, W. P., Grant, P. S., Myers, J. S., Arnold, G. T., Plantnick, S. E., Gumley, L. E., Tsay, S. C., Moeller, C. C., Fitzgerald, S. E., Brown, K. S., & Osterwisch, F. G. 1996. " Airborne Sacnning spectrometer for remote sensig of cloud, aerosol, water vapor and surface properties". Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. 13: 38-42 p.
- Lang, H. R., Adams, S.L., Conel, J.E., Mcguffie, B.A., Paylor, E.D., and Walker, R.E. 1987. "Multispectral remote sensing as stratigraphic and structural tool, Wind River Basin and Big Horn Basin areas, Wyoming." American Association of Petroleum Geologists Bulletin 71(4): 389-402 p.
- Lewis, CJ. 1996, Stratigraphy and geochronology of Mioceno and Pliocene volcanic and marine rocks in the Sierra San Fermín and southern Sierra San Felipe, Baja California, Mexico: Geofísica Internacional, 35: 3-25 p.
- McFadden, L.D., S.G. Wells, and M.J. Jercinovich. 1987. Influences of eolian and pedogenic processes on the origin and evolution of desert pavements. Geology. 15: 504-508 p.
- Martín-Barajas, A., Téllez-Duarte, M., y Rendón-Márquez, G. 1993. "Estratigrafía y ambientes de deposito de la secuencia marina de Puertecitos, NE de Baja California. Implicaciones sobre la evolución de la margen occidental de la depresión del golfo". En: Delgado-Argote, L.A., y Martín-Barajas, A. (eds). Contribuciones a la Tectónica del Occidente de México. Ensenada, B.C. CICESE. Monografía 1: 90-114 p.

- Martín-Barajas, A., Stock, J.M. 1993. “Estratigrafía y petrología de la secuencia volcánica de Puertecitos, noreste de Baja California. Transición de un arco volcánico a rift”. En: Delgado Delgado-Argote, L.A. y Martín-Barajas, A. (eds). Contribuciones a la Tectónica del Occidente de México. Ensenada, B.C. CICESE. Monografía. 1: 66-89 p.
- Martín-Barajas, A., y Stock, J.M., Layer, P., Hausback, B., Renne, P., y Lopez-Martinez, M. 1995. “Arc-rift transition volcanism in the Puertecitos Volcanic Province, northeastern Baja California, Mexico.” Geological Society of America Bulletin 107(4): 407-424 p.
- Nagy, E. A. 1997. Extensional deformation and volcanism within the northern Puertecitos Volcanic Province, Sierra Santa Isabel, Baja California, Mexico. Ph. Thesis. Pasadena, California. 363 p.
- NASA. 1999. MASTER Missions.
<http://masterweb.jpl.nasa.gov/data/default.htm?sort=&MissionYear=1999>.
Consulta: Marzo de 2004.
- NASA. 1999. “Spectral Library”. California Institute of Technology and U.S. Government. <http://speclib.jpl.nasa.gov/>. Consulta: Enero de 2004.
- NASA. 2000. Ficha técnica resumida de LANDSAT 7 ETM.
<http://hpwww.gsfc.nasa.gov/IAS/handbook/handbook.html>.
Consulta: Noviembre de 2004.
- NASA- National Aeronautics and Space Administration. (2003)
<http://masterweb.jpl.nasa.gov>
<http://modis.gsfc.nasa.gov/about/> Consulta: Octubre de 2004.
- Noyola-Medrano, C. 1999. “Aplicación de la percepción remota (Landsat TM) en la caracterización litológica de la franja costera entre Puertecitos y Bahía de San Luis Gonzaga, Baja California, México”. Tesis de Maestría, CICESE. 173 p.
- Noyola- Medrano, Hinojosa-Corona., Martín-Barajas, A. 2005. Caracterización litológica de regiones desérticas mediante técnicas de percepción remota: Un ejemplo en la franja costera central de Baja California, México. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 22 (2): 225–229 p.
- Paculluconi, F.D., & Meeks, G.R. 1985. “Thermal infrared multispectral scanner (TIMS): an investigator’s guide to TIMS data”. JPL Publication, 105 p.

- Pino, S. F., 2003. "Comparación de métodos de clasificación digital de imágenes de satélite: una aplicación a un sector de la ciudad de Santiago". Universidad Tecnológica Metropolitana.
http://www.utem.cl/trilogia/Volumen_15_n_23_24/p_15_3.htm.
Consulta: Enero de 2005.
- Prades, I. V., Albert, C. M., Dalmases, I. S., Pi, G. M., Muns, J. S., Guillen. 2001 "Un programa para el tratamiento de imagen aplicado a la teledección". Revista Internacional de Ciencias de la Tierra. 19: 33-46.
- Ready, P.J., Wintz, P.A. 1973. Information Extraction, SNR Improvement, and Data Comparison in Multispectral Imagery, *I.E.E.E. Transactions on Communicatios*. 21 (10): 1123-1130 p.
- Recondo G., García R., Adrados G., Garcia M. 2001. "Mejores métodos de detección de zonas quemadas en Asturias a partir del análisis multitemporal de imágenes Landsat-TM". Revista internacional de Ciencias de la Tierra. Art. 65.
http://www.mappinginteractivo.com/plantilla-ante.asp?id_articulo=65. Consulta: Septiembre de 2005.
- Ribeiro de Almeida, T.I., Ferreira da Silvo-Filho, W., Siquiera-Sayeg, H., Luis-Fambrini, G., Machado, R., Fragoso-Cesar, A.R.S. 1995. Procesamiento digital e interpretación geológica de imágenes TM-Landsat del área al Este de lamina de Camaqua (limite proterozoico/fanerozoico), estado de Rio Grande do Sul-Brasil. VII Simposio Latinoamericano de Percepción Remota, Puerto Vallarta, Noviembre de 1995. 469 p.
- Richards, J.A. 1993. "Remote Sensing Digital Image Analysis". Berlin, Springer Verlag. 281 p.
- Rivard, B., Arvidson, R.E. 1992. "Utility of imaging spectrometry for lithologic mapping in Greenland." *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 58(7): 945-949 p.
- Rivard, B., Petroy, S.B., y Miller, J.R. 1993. „Measured effects of desert varnish on the mid-infrared spectra of weathered rocks as an aid to TIMS imagery interpretation“. *IEEE Transactions on Geosciencie and Remote Sensing* 31: 284-291 p.
- Rowan, L. C., Wetlaufer, P.H., Goetz, A.F.H., Billingsley, F.C., and Stewart, J.H. 1974. "Discrimination of rock types and detection of hydrothermally altered areas in south-central Nevada by the use of computer-enhanced ERTS images." USGS, Prof. paper. 883: 34-25 p.

- Rowan, L. C., Goetz, A.F.H., y Ashley, R.P. 1977. "Discrimination of hydrothermally altered and unaltered rocks in visible and near infrared multispectral images." *Geophysics* 42(3): 522-535 p.
- Sabins, F.F. 1997. "Remote Sensing: Principles and Application". New Cork, W.H. Freeman and Co. 494 p.
- Salomonson, V.V., Barnes, W.L., Maymon, P.W., Montgomery, H. E., & Ostrow, H. 1989. MODIS: advanced facility instrument for studies of the earth a system. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 27: 145-153 p.
- Schowengerdt, R. 1997. *Remote sensing: Models and methods for image processing*, 2nd ed. Academic Press. 11: 179-98 p.
- SIGSA 2004. Percepción Remota. Sistema de Información Geográfica, S. A. de C.V. <http://www.sigsa.info/index.php?option=content&task=view&id=71&Itemid=2>
Consulta: Octubre de 2005.
- Simon J. Hook., Jeffrey J. Myers., Kustis J. Thome., Michael Fitzgerald., Anne B. Kahle. 2001. "The MODIS/ASTER airborne simulator (MASTER) – a new instrument for earth science studies". *Magazine of Remote Sensing of Environment*. 76: 93-102 p.
- Stock, J.M. 1989. "Sequence and geochronology of Miocene rocks adjacent to the main gulf escarpment: Southern Valle Chico, Baja California Norte, Mexico". *Geofísica Internacional* 28 (5): 851-896 p.
- Stock, J.M., Martín-Barajas, A., Suárez—Vidal, F., y Miller, M.M. 1991. "Miocene to Holocene extensional tectonics and volcanic stratigraphy of NE Baja California, Mexico". *Geological excursion in the southern California and Mexico*. M. J. Walawender, and Hanan, B.B. San Diego, Ca., Geological Society of America. Guide book for the Annual Meeting. 67 p.
- Stock, J. M., Commenetz, J. 1992. "Use of Landsat-TM data to distinguish among volcanic rock types, Puertecitos Volcanic Province, Baja California, Mexico." *EOS Trans. American. Geophys. Union* 73(43): 613 p.
- Sultan, M., Arvidson, R.E., Sturchio, N.C., and Guinness, E.A. 1987. "Lithologic mapping in arid region with Landsat Thematic mapper data: Meatiq dome, Egypt". *Geological Society of America Bulletin* 99: 748-762 p.
- USGS. 2004. Satélite Landsat TM y ETM. <http://edc.usgs.gov/product/satellite/landsat7.html> Consulta: Agosto de 2005.

- Vicent, R.K., 1997. "Fundamentals of geological and environmental remote sensing". New Jersey, Prentice Hall. 370 p.
- Yamaguchi, Y., Kahle, A.B.,Tsu, H., Kawakami, T., & Pniel, M. 1998. Overview of advanced space borne thermal emission and reflectance radiometer. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 36: 1062-1071.

ANEXO A**GLOSARIO DE ACRÓNIMOS :**

AAAM: Abanico aluvial del arroyo Matomí.

ACP: Análisis de componentes principales.

AEC: Arroyo El Canelo.

AH: Ápice hidrográfico

ALC: Arroyo La Cantera.

AM: Arroyo Matomí

ASTER: Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer.

AT: Ápice topográfico.

CP: Componente principal.

GMT: Greenwich Mean Time.

HN: Huracán Nora.

IC: Infrarojo cercano (0.7 μm – 1.1 μm)

ICR: Índice de contenido de roca.

INEGI: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.

LANDSAT TM: Sensor LANDSAT Thematic Mapper.

LANDSAT ETM: Sensor LANDSAT Enhanced Thematic Mapper.

MASTER: Sensor aerotransportado simulador de instrumentos MODIS/ASTER.

MID: Infrarojo intermedio (3.1 μm – 6.1 μm)

MODIS: Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer.

PVP: Provincia Volcánica de Puertecitos

RVA: Rojo, Verde, Azul.

SIG: Sistema de información Geográfica.

SWIR: Infrarojo medio o de onda corta. $1.1 \mu\text{m} - 3.1 \mu\text{m}$

TIR: Infrarojo Térmico ($6.1 \mu\text{m} - 15.5 \mu\text{m}$).

TKL: Transformada de Karhunen-Loève.

USGS: US Geological Survey.

UTM: Universal Tranversa de Mercator.

VISIBLE: $0.4 \mu\text{m} - 0.7 \mu\text{m}$.

VNIR: Visible e Infrarojo Cercano ($0.4 \mu\text{m} - 1.1 \mu\text{m}$).

WRS2: Sistema mundial de referencia 2 para Landsat.

ANEXO B.

Características Técnicas del Sensor MASTER.

Canal Espectral	Centro de Banda (μm)	Longitud de Onda (μm)	Rango Espectral
1	0.460	0.04	0.440-0.480
2	0.500	0.04	0.480-0.520
3	0.540	0.04	0.520-0.560
4	0.580	0.04	0.560-0.600
5	0.660	0.06	0.630-0.690
6	0.710	0.04	0.690-0.730
7	0.750	0.04	0.730-0.770
8	0.800	0.04	0.780-0.820
9	0.865	0.04	0.845-0.885
10	0.905	0.04	0.885-0.925
11	0.945	0.04	0.925-0.965
12	1.625	0.05	1.600-1.650
13	1.675	0.05	1.650-1.700
14	1.725	0.05	1.700-1.750
15	1.775	0.05	1.750-1.800
16	1.825	0.05	1.800-1.850
17	1.875	0.05	1.850-1.900
18	1.925	0.05	1.900-1.950
19	1.975	0.05	1.950-2.000
20	2.075	0.05	2.050-2.100
21	2.160	0.05	2.135-2.185
22	2.210	0.05	2.185-2.235
23	2.260	0.05	2.235-2.285
24	2.3295	0.065	2.297-2.362
25	2.3945	0.065	2.362-2.427
26	3.150	0.15	3.075-3.225
27	3.300	0.15	3.225-3.375
28	3.450	0.15	3.375-3.525
29	3.600	0.15	3.525-3.675
30	3.750	0.15	3.675-3.825
31	3.900	0.15	3.825-3.975
32	4.050	0.15	3.975-4.125
33	4.200	0.15	4.125-4.275
34	4.375	0.15	4.300-4.450
35	4.500	0.15	4.425-4.575
36	4.650	0.15	4.575-4.725
37	4.800	0.15	4.725-4.875
38	4.950	0.15	4.875-5.025
39	5.100	0.15	5.025-5.175
40	5.250	0.15	5.175-5.325
41	7.900	0.4	7.70-8.10
42	8.300	0.4	8.10-8.50
43	8.700	0.4	8.50-8.90
44	9.100	0.4	8.90-9.30
45	9.700	0.4	9.50-9.90
46	10.100	0.4	9.90-10.30
47	10.625	0.65	10.30-10.95
48	11.300	0.7	10.95-11.65
49	12.050	0.5	11.80-12.30
50	12.750	0.5	12.50-13.0

Claves y coordenadas de los sitios muestreados en campo.

Arroyo	Clave	Coordenadas	
		X	Y
Matomí	M-01	723751	3376665
	M-03	724589	3377064
	M-04	717183	3373363
	M-05	718549	3373837
	M-06	720012	3374751
	M-07	720503	3374662
	M-08	725781	3376756
	M-09	719253	3373727
	M-10	722534	3374983
	M-12	726870	3375086
	M-14	717758	3373676
	M-16	717206	3372470
	M-17A	717068	3373010
	M-17B	717068	337985
	M-18	717870	3373937
	M-19A	719298	3372964
	M-19B	719273	3372988
	M-20	721154	3374820
	M-21	721118	3374285
	M-22A	722079	3375564
	M-22B	722265	3375537
	M-24	722455	3374554
	M-25	723334	3375280
	M-26	724148	3375153
	M-29	725034	3375169
M-36	726280	3377546	
M-150	717095	3373245	

(Continuación) Claves y coordenadas de los sitios muestreados en campo

Arroyo	Clave	Coordenadas	
		X	Y
Canelo	C-39	720121	3372795
	C-43	724643	3372416
	C-44	724343	3373036
	C-46	718081	3371054
	C-47	718255	3370687
	C-48A	718616	3370870
	C-48B	718549	3370952
	C-49	719088	3371258
	C-55	721033	3373224
	C-56	722307	337357
	C-57	724371	3373636
	C-59	724984	3371830
	C-60	724973	3371430
	C-62	724775	3374189
	C-67	726856	3372346
La Cantera	Ca-75	725475	3370074
	Ca-78	725556	3370001
	Ca-81	724886	3367116
	Ca-84	725952	3368474
	Ca-92	726781	3369863
	Ca-93	727008	3369222
	Ca-96	727492	3367605
Ca-113	722184	3376392	

Características técnicas de los sensores remotos, ASTER, Landsat TM y ETM.

Regiones del espectro	Sensor ASTER Intervalo espectral y resolución espacial	Sensores TM y ETM
VNIR	0.52 - 0.60 μm / 15 m 0.63 - 0.69 μm / 15 m 0.78 - 0.86 μm / 15 m	0.45 - 0.52 μm / 30 m 0.52 - 0.60 μm / 30 m 0.63 - 0.69 μm / 30 m 0.76 - 0.90 μm / 30 m 0.52 - 0.90 μm / 15 m (PAN)
SWIR	1.6 - 1.7 μm / 30m 2.145 - 2.185 μm / 30 m 2.185 - 2.225 μm / 30 m 2.235 - 2.285 μm / 30 m 2.295 - 2.365 μm / 30 m 2.360 - 2.430 μm / 30 m	1.55 - 1.75 μm / 30m 2.08 - 2.35 μm / 30 m
TIR	8.125 - 8.475 μm / 90 m 8.475 - 8.825 μm / 90 m 8.925 - 9.275 μm / 90 m 10.25 - 10.95 μm / 90 m 10.95 - 11.65 μm / 90 m	10.40 - 12.50 μm / 60 m