



Universidad de Los Andes
Facultad de Ciencias Forestales
y Ambientales
Centro de Estudios Forestales y Ambientales
de Postgrado.
Programa de Maestría en Manejo de Cuencas
Hidrográficas

Evaluación Multitemporal de Procesos de Erosión en
Laderas mediante el Uso de Sensores Remotos.
Caso de estudio: Micro-cuenca Torrencial “La
Machirí” San Cristóbal, Edo. Táchira

(Trabajo de Grado)

Lcdo. Camargo Cristopher

Profesor Tutor: Ing. MSc. Vidal Raúl

Profesor Cotutor: Ing. MSc. Andrades Jesús

Mérida, junio de 2012

c.c Reconocimiento

AGRADECIMIENTOS

Agradezco enormemente a la Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales de la Universidad de Los Andes (Mérida-Venezuela), por ser el recinto donde pude llevar a cabo mi formación en cuanto al Manejo de Cuencas Hidrográficas.

En segunda instancia, quiero agradecer a los Ing. Raúl Vidal y Jesús Andrades, por ser los asesores del presente trabajo de grado, quienes siempre estuvieron disponibles y con buen ánimo de aclarar mis dudas y enseñarme enfoques del conocimiento científico y con los cuales siempre estaré en deuda.

A la Universidad Distrital Francisco José de Caldas (Bogotá-Colombia), por permitirme usar sus instalaciones en la generación de los modelos ameritados para la consecución de los objetivos.

Al profesor Antonio Hernández Espinoza, por la instrucción y las sugerencias dadas en la generación de los modelos fotogramétricos.

A los Ing. Jaime Suarez en Bucaramanga, Gonzalo Duque en Manizales y Leonardo Mendoza en Bogotá respectivamente, por sus valiosos comentarios, los cuales ayudaron a aclarar muchos aspectos relacionados con los procesos de erosión y los procesos fotogramétricos.

Al Instituto Geográfico Venezolano Simón Bolívar (IGVSB), al Ministerio del Poder Popular para el ambiente (MPPA, sede San Cristóbal) y CORPOANDES (sedes Mérida y San Cristóbal), y muy especialmente al personal que trabajan allí, por la colaboración prestada en la adquisición de las fotografías aéreas, imagen satelital y publicaciones, recursos indispensables para llevar a cabo este trabajo.

A los Ing. Ennio Pozzobon, Roberto López, Geógrafo Esneira Quiñonez y al Dr. Alexander Parra por sus valiosas enseñanzas en Teledetección ambiental, Sistemas de Información Geográfica y Metodología de la investigación, sin ellas, hubiera resultado imposible abordar el tema de los procesos de erosión en la micro-cuenca torrencial “La Machirí”.

Mil gracias a mis colegas y amigos, muy especialmente entre estos últimos mencionados, a la Ing. Alexandra Rojas, por su disposición a la revisión del manuscrito y quien a su vez fue un baluarte en la realización del trabajo, pues sin su ayuda y su aliento no hubiera sido posible la concreción del mismo.

A mi familia, en especial a mis padres y mi tía Gladys por todo lo bueno que me han dado y todo lo sacrificado a lo largo mi estudios de postgrado y en la realización del trabajo de grado.

www.bdigital.ula.ve

c.c Reconocimiento

RESUMEN:

Se evaluó la dinámica de los procesos generadores de volúmenes de suelo desplazados por procesos de erosión, mediante el estudio multi-temporal de fotografías aéreas e imagen satelital SPOT-5 en la micro-cuenca torrencial “La Machirí”, lográndose a partir de ellas inferir el posible origen y la estimación de la evolución, estado, tipo y grado de los mismos para los periodos 1952-1976 y 1976-2010, resultados que fueron reforzados con el estudio de las medidas y experiencias de conservación y recuperación desarrolladas en el área. El estudio también comprendió una estimación de volúmenes de roca y/o suelo removido por dichos procesos a partir de DEMs obtenidos desde curvas de nivel digitalizadas en pantalla para el año 1971 y las generadas a través de un proceso de restitución fotogramétrica sobre las fotografías tomadas por la misión aérea 0102121 en 1976 para el área.

Un análisis inicial, permitió observar que el área afectada por los procesos activos de erosión oscilaba en 96,06 ha para el año 1952, luego en 1976 (después de la implementación de algunas medidas técnicas), el área que mostraba tal problemática se había reducido a 61,57 ha, denotando una recuperación de 34 ha aproximadamente; El estudio en 2010 arrojó como resultado 56,68 ha en estado activo de procesos de erosión, lo que inicialmente permitió concluir que la recuperación de las áreas afectadas se logró significativamente a comienzos de los setenta, lográndose muy poco avance en los años siguientes.

Palabras claves: La Machirí, erosión, sensores remotos, análisis multitemporal.

ABSTRACT

It was evaluated the dynamics of the processes generating volumes of soil displaced by erosion processes, through the multi-temporal study of aerial photographs and satellite image SPOT-5 in the micro-catchment torrential "La Machirí", being achieved from them to infer from the possible origin and estimation of the evolution, status, type and degree of the same for the periods 1952-1976 and 1976-2010, results were reinforced with the study of measures and conservation experiences and recovery developed in the area. The study included an estimate of rock volumes and/or soil removed by these processes from DEMs derived from obtained from contour lines digitized on the screen for 1971 and those generated through photogrammetric restitution process on photographs taken by the air mission 0102121 in 1976 for the area.

An initial analysis, permitted to observe, the area affected by the active processes of erosion ranged in 96.06 ha for 1952, then in 1976 (after implementation of certain technical measures), the area showing such problems had been reduced to 61.57 ha., denoting a recovery of approximately 34 ha.; the study in 2010 showed 56.68 ha. in active state of processes of erosion, Initially it permitted conclude that the recovery of the affected areas, it was achieved significantly at the beginning of the seventy, being achieved very little advance in the following years.

Keywords: The Machirí, erosion, remote sensing, multitemporal analysis.

TABLA DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS.....	2
RESUMEN:	5
ABSTRACT.....	6
TABLA DE CONTENIDO.....	7
LISTA DE FIGURAS.....	10
LISTA DE TABLAS.....	12
CAPITULO I.....	14
INTRODUCCION.....	14
1. JUSTIFICACIÓN Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	17
1.1. OBJETIVOS.....	21
1.1.1. GENERAL	21
1.1.2. ESPECÍFICOS	21
CAPITULO II	22
2. MARCO TEORICO	22
2.1. CONSIDERACIONES GENERALES.....	22
2.2. DEFINICIÓN DE PROCESOS DE EROSIÓN	25
2.3. REPERCUSIONES DE LOS PROCESOS DE EROSIÓN	26
2.4. IMPORTANCIA DE LOS PROCESOS DE EROSIÓN	28
2.5. DEFINICIÓN DE EROSIÓN HÍDRICA.....	30
2.6. DESCRIPCIÓN DE LOS TIPOS DE PROCESOS DE EROSIÓN.....	30
2.6.1. DESCRIPCIÓN DE LOS PROCESOS DE EROSIÓN EN VERTIENTE.....	32
2.6.1.1. POR SALPICADURA	32
2.6.1.3. CONCENTRADA	33
2.6.1.3.1. POR SURCOS	33
2.6.1.3.2. POR CÁRCAVAS	34
2.6.1.4. POR MOVIMIENTOS DE MASA.....	34
2.6.2. DESCRIPCIÓN DE LOS PROCESOS DE EROSIÓN EN CAUCE.....	36
2.6.2.1. POR SALPICADURA.....	36
2.6.2.2. SOCAVACIÓN VERTICAL O DE FONDO	36
2.6.2.3. SOCAVACIÓN HORIZONTAL	36
2.7. EXPERIENCIAS EN EL ANÁLISIS DE PROCESOS DE EROSIÓN.....	37
2.7.1. USO DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG) Y DE LOS SENSORES REMOTOS EN EL ESTUDIO DE LOS PROCESOS DE EROSIÓN	37
2.7.2. ANTECEDENTES	40
2.7.3. MÉTODO DE CLASIFICACIÓN DE LOS PROCESOS DE REMOCIÓN	44
2.7.4. HERRAMIENTAS PARA EL ANÁLISIS EXPLORATORIO DE DATOS ESPACIALES	45
2.7.4.1. HISTOGRAMA.....	46
2.7.4.2. POLÍGONOS DE THIESSEN.....	46
2.7.4.3. GRÁFICOS DE PROBABILIDAD NORMAL Q-Q	46
2.7.5. ANÁLISIS GEOESTADÍSTICO DE PUNTOS.....	47

2.7.5.1. ANÁLISIS DE MÍNIMA DISTANCIA.....	47
2.7.5.2. ANÁLISIS DE PATRONES ESPACIALES.....	47
2.7.5.3. VARIOGRAMA	47
2.7.5.4. SUPERFICIE VARIOGRÁFICA	48
CAPITULO III.....	50
3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	50
3.1. UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	50
3.2. CLIMA.....	51
3.3. GEOLOGÍA	52
3.4. GEOMORFOLOGÍA.....	52
3.5. SUELOS	54
3.6. VEGETACIÓN	55
3.7. HIDROGRAFÍA	55
3.8. MATERIALES REQUERIDOS	56
3.8.1. FOTOGRAFÍAS AÉREAS	56
3.8.2. CARTAS CARTOGRÁFICAS.....	56
3.8.3. IMAGEN SATELITAL SPOT 5	57
4. ADQUISICIÓN DE FOTOGRAFÍAS AÉREAS E IMAGEN SATELITAL SPOT 5.....	58
5. CORRECCIÓN DE IMÁGENES	59
6. MEJORAMIENTO DE IMAGEN SATELITAL	59
7. GEOREFERENCIACIÓN DE MAPAS	60
8. GEOREFERENCIACIÓN CORRECTA DE FOTOGRAFÍAS AÉREAS BASADO EN ORTOFOTO.	60
9. METODOLOGÍAS DE EVALUACIÓN DE PROCESOS DE EROSIÓN	62
9.1. EVALUACIÓN DE LA EROSIÓN UTILIZANDO DIVERSOS MDE.....	62
9.2. EVALUACIÓN DEL ESTADO DE LOS PROCESOS DE EROSIÓN.....	66
9.3. SISTEMA DE CLASIFICACIÓN DE LA EROSIÓN EN ÁFRICA MERIDIONAL	67
9.4. ELABORACIÓN DE MDT A PARTIR DE PROCESO FOTOGRAMÉTRICO DIGITAL SOBRE MISIÓN AEROFOTOGRAFÍA 0102121, AÑO 1976, ESCALA 1:25.000 (FOTOS: 081-082-083)	68
9.5. GEOREFERENCIACIÓN Y CORRECCIÓN DE DISTORSIONES DE FOTOGRAFÍAS AÉREAS A PARTIR DE UNA ORTOFOTO.....	72
CAPITULO IV	74
10. RESULTADOS	74
10.1. GEOREFERENCIACIÓN DE MAPAS Y DETERMINACIÓN DE PUNTOS DE CONTROL	74
10.1.1. CARTAS TRANARG C.A. 1971 “LA MACHIRI” (HOJAS D-6, D-7, E-6, E-7).....	74
10.2. EVALUACIÓN DE LA EROSIÓN UTILIZANDO DIVERSOS DEMs.	76
10.2.1. DEM OBTENIDO A PARTIR DE DIGITALIZACIÓN DE CURVAS DE NIVEL ELABORADAS POR TRANARG C.A. AÑO 1971.....	76
10.2.2. DEM OBTENIDO A PARTIR DE PROCESO FOTOGRAMÉTRICO DIGITAL SOBRE MISIÓN AEROFOTOGRAFÍA 0102121, AÑO 1976, ESCALA 1:25.000 (FOTOS: 081-082-083)	77
10.2.3. EVALUACIÓN DE MODELO POR MEDIO DE LOS VALORES DE CELDA EN PUNTOS DE CONTROL CONOCIDOS	79
10.2.4. ANÁLISIS EXPLORATORIO DE DATOS ESPACIALES SOBRE VALORES DE CELDAS EN PUNTOS DE CONTROL CONOCIDOS.	80
10.2.5. ANÁLISIS EXPLORATORIO DE DATOS ESPACIALES SOBRE VALORES DE CELDAS EN PUNTOS NO CONOCIDOS, OBTENIDOS POR POLÍGONOS DE THIESEN	81

10.2.6. ESTIMACIÓN DE VOLUMEN EN ÁREA COINCIDENTE ENTRE LOS DEMs DE LOS AÑOS 1971 Y 1976.....	83
10.2.7. GEOESTADÍSTICA DE PUNTOS.....	98
10.2.7.1. ANÁLISIS DE MÍNIMA DISTANCIA	98
10.2.7.2. ANÁLISIS DE PATRONES ESPACIALES	99
10.2.7.3. VARIOGRAMA	100
10.2.7.4. SUPERFICIE VARIOGRÁFICA	101
10.3. GENERACIÓN DE ORTOFOTO	104
10.4. FOTOGRAFÍAS AÉREAS DE MISIONES A-34 Y 0102138 GEOREFERENCIADAS Y CORREGIDAS.....	104
10.5. ESTADO DE LOS PROCESOS DE EROSIÓN	105
10.6. TIPOS DE PROCESO DE EROSIÓN	112
10.7. GRADO DE LOS PROCESOS DE EROSIÓN	114
10.8. ORIGEN DE LOS PROCESOS DE EROSIÓN	116
10.9. MEDIDAS Y EXPERIENCIAS DESARROLLADAS	118
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	133
REFERENCIAS CITADAS:	137
ANEXOS.....	142
ANEXO A. RESUMEN DE FLUJO DE TRABAJO	143
ANEXO B. RESUMEN DE ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS MODELOS.....	144
ANEXO C. DATOS DE CÁMARA EN EL PROCESO FOTOGRAMÉTRICO DIGITAL.	144
ANEXO D. RESUMEN DE METODOLOGÍA, ANÁLISIS DESARROLLADOS Y RESULTADOS OBTENIDOS.	145

www.bdigital.ula.ve

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema tentativo (Elaboración propia).	24
Figura 2. Tipos de erosión. (Elaboración propia).	32
Figura 3. Representación de valores de semivarianza frente a distancia, formando la nube del variograma (Fuente: Olaya, 2011).	48
Figura 4. Micro-cuenca torrencial La Machirí.	51
Figura 5. Proceso fotogramétrico (tomado de Hernández, 2008a).	63
Figura 6. Esquema que muestra la conformación del bloque basado en las fotografías aéreas de la misión 0102121, a su vez se representa con triángulos los puntos de control y con cuadrados los puntos de amarre en el software fotogramétrico.	69
Figura 7. Marcas fiduciales extraídas con SIG sobre fotografías aéreas de la misión 0102121.....	69
Figura 8. Generación y edición del MDE. En la imagen superior se muestra el resultado del modelo generado y en la inferior el suavizado de las curvas obtenidas (visión estereoscópica por medio de anáglifo).	70
Figura 9. Creación del formato “shape” usado con el Sistema de Información Geográfica (SIG), mediante la elaboración de una máscara (polígono) y el geoprocso “intersección” se extrajo la sección correspondiente al área de estudio, con el cual se generó El TIN (Red de triángulos irregulares) y la vista 3D del mismo.	71
Figura 10. Georeferenciación y Determinación de puntos de control. Cartas 1:2.500.	74
Figura 11. Digitalización de curvas de nivel elaboradas por TRAGNAR C.A. 1971.....	76
Figura 12. Creación de Raster de Elevación con tamaño de pixel de 2 m. para el modelo elaborado por TRAGNAR C.A. (1971).	77
Figura 13. Creación de Raster de Elevación con tamaño de pixel de 2 m. para el modelo elaborado a partir del proceso fotogramétrico (1976).....	78
Figura 14. Generación de curvas de nivel para el área de estudio restituidas fotogramétricamente sobre fotos de misión 0102121 de 1976.	78
Figura 15. Extracción de valores de celdas por puntos de control.....	80
Figura 16. Gráfico de probabilidad general Q-Q.los cuales representan los cuantiles de una distribución. En el eje X se hallan los valores de las celdas del DEM fotocorre y en el eje Y los valores correspondientes al DEM CTcorre.	81
Figura 17. Puntos generados a partir de los vértices de los nodos de los polígonos de Thiessen (Verde). Los polígonos partieron de los puntos conocidos denominados como “puntosvisibles” (Rojo).	82

Figura 18. Gráfico de probabilidad general Q-Q, los cuales representan los cuantiles de una distribución. En el eje X se hallan los valores de las celdas del DEM fotocorre y en el eje Y los valores correspondientes al DEM CTcorre basados sobre los 25 puntos obtenidos por medio de los polígonos de Thiessen.....	82
Figura 19. Generación de mascarar e intersección de las mismas para la obtención del área común a ser evaluada (área donde se elaboró el TIN y posterior DEM).....	83
Figura 20. Corrección de los raster Tragnar (1971) y modelo fotogramétrico (1976). Columnas: 1382 y filas: 758 en ambos.	84
Figura 21. Sustracción generada entre el DEM CTcorregido y Mfotcorregido.	86
Figura 22. Valores reclasificados en 5 clases. Sustracción entre los modelos de área en común con respecto al área total de la cuenca.	87
Figura 23. Reclasificación en 5 clases.	88
Figura 24. Reclasificación en 5 clases sobre ortofoto y con puntos de control de área en común con respecto al área total de la cuenca.	90
Figura 25. Reclasificación en 5 clases para tres áreas sobre ortofoto y con puntos de control.	92
Figura 26. Reclasificación en 5 clases para área 1.....	93
Figura 27. Reclasificación en 5 clases para área 2.....	94
Figura 28. Reclasificación en 5 clases para área “Los Pinos”.....	94
Figura 29. Raster conteniendo los puntos de control (Puntos rojos) y los puntos generados a partir de los nodos de los polígonos de Thiessen.	98
Figura 30. Análisis de Patrones Espaciales para puntos de control.	99
Figura 31. Análisis de Patrones Espaciales para puntos generados por polígonos de Thiessen.	100
Figura 32. Semivariograma obtenido para puntos de control (izquierda) y para para puntos obtenidos a través de los polígonos de Thiessen (derecha).....	101
Figura 33. Superficie semivariográfica para los puntos de control.....	102
Figura 34. Superficie semivariográfica para los puntos extraídos a partir de los polígonos de Thiessen.	102
Figura 35. Área y puntos que mejorarían el modelo de curvas de nivel y dem obtenido para el año 1976	103
Figura 36. Lado izquierdo: ortofoto obtenida mediante el proceso fotogramétrico. Lado derecho: resultado de la intersección de las áreas coincidentes para la obtención del área común mostrada sobre la ortofoto generada a partir de la misión 0102121 de 1976.	104
Figura 37. Resultado de la intersección de las áreas coincidentes para la obtención del área común mostrada sobre la ortofoto generada para la misión A-34 de 1952 (foto 804).	104

Figura 38. Resultado de la intersección de las áreas coincidentes para la obtención del área común mostrada sobre la ortofoto generada para la misión 0102138 de 1983 (foto 132).....	105
Figura 39. Canal de la cárcava Los Pinos en la micro-cuenca “La Machirí”	111
Figura 40. Fondo de valle con sedimentos en la micro-cuenca torrencial La Machirí.	112
Figura 41. Socavación horizontal inducida por los cauces tributarios y principal de la micro-cuenca torrencial la Machirí.....	114
Figura 42. Instalaciones del Puesto de la Machirí y misión del mismo.	124

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Distribución de diferentes espacios fisiográficos en Venezuela (Delgado, 2009).....	29
Tabla 2. Clasificación de los procesos de remoción en masa modificada de Varnes, 1978 en Moreiras et al., 2008).....	45
Tabla 3. Resolución espectral de imagen SPOT 5 (SPOT IMAGE, 2005a).....	58
Tabla 4. Clasificación de la erosión laminar de acuerdo al sistema desarrollado por SARCCUS en 1981 (Larsson y Strömquist, 1995).....	67
Tabla 5. Clasificación de la erosión en cárcavas de acuerdo al sistema desarrollado por SARCCUS en 1981(Larsson y Strömquist, 1995).....	68
Tabla 6. Puntos de control utilizados en la georeferenciación de la fotografía área 804 (misión A-34) extraídos a partir de ortofoto generada desde las fotografías aéreas de misión 0102121, (Sistema de Referencia WGS 1984 UTM Zona 18N).	72
Tabla 7. Puntos de control utilizados en la georeferenciación de la fotografía área 132 (misión 0102138) extraídos a partir de ortofoto generada desde las fotografías aéreas de misión 0102121, (Sistema de Referencia WGS 1984 UTM Zona 18N).	73
Tabla 8. Determinación de las coordenadas (X, Y, Z).	75
Tabla 9. Valores de celda para los puntos de control.	79
Tabla 10. Evaluación y Comparación de los valores de Área 2D, Superficie de Área y Volumen del Modelo digitalización de curvas de nivel (1971) y el Modelo fotogramétrico digital (1976).....	84
Tabla 11. Estadísticos descriptivos de los DEMs generados.	85
Tabla 12. Área y porcentajes de la reclasificación en 5 clases.	89
Tabla 13. Coordenadas de extensión de áreas a estudiar.....	91
Tabla 14. Área y porcentajes de la reclasificación en 5 clases para área 1.....	93

Tabla 15. Área y porcentajes de la reclasificación en 5 clases para área 2.....	93
Tabla 16. Área y porcentajes de la reclasificación en 5 clases para área “Los Pinos”.....	94
Tabla 17. Estadísticos descriptivos de los DEMs Área 1, Área 2 y Área “Los Pinos”.....	96
Tabla 18. Evaluación y Comparación de los valores de Área 2D, Superficie de Área y Volumen del Modelo digitalización de curvas de nivel (1971) y el Modelo fotogramétrico digital (1976) para las áreas 1,2 y “Los Pinos”.....	97
Tabla 19. Análisis de mínima distancia para puntos de control (izquierda) y para puntos generados por polígonos de Thiessen (derecha).....	99
Tabla 20. Clases desarrolladas para A-34, ortofoto 0102121 e imagen satelital SPOT.....	106
Tabla 21. Clases 1952.....	108
Tabla 22. Clases 1976.....	108
Tabla 23. Clases 2010.....	108
Tabla 24. Resultado intersección Procesos activos 1976 vs clases 1952.....	109
Tabla 25. Resultado intersección fondo de valle con sedimentos 1976 vs clases 1952.....	109
Tabla 26. Resultado intersección bosques 1952 vs clases 1976.....	110
Tabla 27. Resultado intersección procesos activos 2010 vs clases 1976.....	110
Tabla 28. Resultado intersección bosques 1976 vs clases 2010.....	111
Tabla 29. Evolución de las áreas reforestadas.....	111
Tabla 30. Resultado intersección fondo de valle con sedimentos 2010 vs clases 1976.....	112
Tabla 31. Tipos de erosión encontrados en el área para 1952.....	113
Tabla 32. Tipos de erosión encontrados en el área para 1976.....	113
Tabla 33. Tipos de erosión encontrados en el área para 2010.....	114
Tabla 34. Grado de erosión para los procesos de erosión en 1952.....	115
Tabla 35. Grado de erosión para los procesos de erosión en 1976.....	115
Tabla 36. Grado de erosión para los procesos de erosión en 2010.....	116
Tabla 37. Cuadro resumen de tenencia de la tierra presente para 1974.....	122
Tabla 38. Algunos trabajos para la cuenca del Río Tórbes.....	131
Tabla 39. Algunos trabajos en el área de la micro-cuenca “La Machiri”.....	132

CAPITULO I

INTRODUCCION

Los procesos de erosión promueven en la superficie del planeta, cambios sustanciales en la alteración de formas en la topografía, al deducir de algunos sitios en zonas altas y con un alto grado de pendiente, volúmenes de roca y suelo, que son transportados hasta ser depositados en otras de menor altitud o grado de inclinación; fenómeno posible, gracias a la fuerza de gravedad que actúa a través de la pendiente sobre los materiales. A este tipo de erosión se le denomina erosión en ladera o vertiente, por ser en esta condición espacial donde se manifiestan con mayor dinamismo (López, 2002).

Dichos procesos no sólo representan una afectación sobre la continuidad del paisaje, sino que poseen implicaciones muy relevantes como pérdida de productividad del suelo para la producción agrícola e incluso pecuaria, daños a infraestructuras, pérdida de vidas humanas, enturbiamiento y deposición de volúmenes de sedimentos sobre los cauces, pérdida de vegetación, entre otras de orden natural (López, 2002), (Prieto, 2008), (Delgado, 2009).

Si bien es cierto que los procesos de erosión ocurridos en ladera denotan una serie de repercusiones negativas sobre el espacio y actividades del hombre de modo directo, su presencia permanente y continua señalan una dinámica que no ha de detenerse aún después de acontecer los hechos puntuales (deslizamientos o desastres evidentes), por el contrario sus efectos son prolongados en el tiempo: constante trabajo de modelado del relieve a partir de la sustracción del material y aporte de materiales sean difusos o concentrados en las zonas bajas, que

representan impactos latentes tanto para los aspectos físicos como antrópicos existentes.

La erosión en ladera, puede suscitarse tanto por un desencadenamiento de orden natural o antrópico, siendo este último el factor que fomenta que estos sean negativos en su totalidad.

La micro-cuenca de “La Machirí” ubicada en el estado Táchira, no ha escapado a los procesos de erosión, la coincidencia de aspectos naturales que le otorgan una cierta fragilidad ambiental y la intervención antrópica, desencadenaron uno de los fenómenos erosivos más importantes al occidente venezolano: “Las Cárcavas de la Machirí”, dado al desequilibrio ecológico que representó en su momento de aparición y que sigue estando presente en nuestros días.

Para entender los procesos de erosión insertos en la micro-cuenca, se amerita el uso de técnicas y métodos confiables y modernos, que en décadas pasadas no se disponían y que limitaban o impedían el desarrollo de una serie de análisis, es por ello que se desean aplicar procedimientos digitales fundamentados principalmente en el avance que han tenido los Sistemas de Información Geográfica (SIG) vinculados a los procedimientos de teledetección, orto-rectificación digital y el sistema de posicionamiento global en la actualidad, a fin de contestar algunos interrogantes, por ejemplo: ¿Cómo ha sido la evolución de los procesos de erosión? ¿Cuáles son las dimensiones de los procesos presentados a lo largo de los años? ¿Qué repercusiones han fomentado la dinámica de los mismos *in situ* y aguas abajo de las laderas? ¿Qué medidas han contribuido a la reducción de los procesos?

El propósito de esta investigación es responder estas interrogantes, a fin de que su resultado ayude a la generación de propuestas y estrategias que propendan por la disminución de los procesos erosivos y sus efectos en el futuro.

Las imágenes de percepción remota y específicamente las fotografías aéreas e imágenes satelitales del área de estudio de distintos años, serán la principal fuente de información. Estas imágenes y en complemento con la información de campo serán tratadas mediante técnicas y procedimientos adecuados para determinar el tipo de proceso de erosión y el grado en que se encuentra el mismo.

Finalmente, se hace perentorio señalar que existen pocos estudios concernientes a los procesos de erosión de la micro-cuenca que la aborden de modo específico, por lo que la presente investigación busca además, llenar los vacíos encontrados en estos, asumiendo que también resulta ser una estupenda oportunidad para comprender los procesos de erosión en ladera.

1. Justificación y planteamiento del problema

Es común hoy en día, encontrar procesos de degradación por erosión en los espacios naturales en toda la extensión de la geografía nacional; algunos de estos procesos pueden desencadenarse debido a la reunión de múltiples factores físico-naturales que señalan un grado alto de fragilidad, que aunado a la presencia de algún detonante (sismos, tormentas, crecidas torrenciales, entre otros) han activado dichos procesos. Ejemplo de ello, lo sucedido en el Palón, municipio Santos Marquina (Edo. Mérida) el 16 de diciembre de 1998, donde las altas pendientes, la inestabilidad geológica, la saturación hídrica del suelo, las precipitaciones acaecidas en las cabeceras de la micro-cuenca y un sismo de 4,2 en la escala de Richter desencadenaron deslizamientos rotacionales y la formación de un abanico de detritos (Ayala, 2006).

La erosión es un proceso de degradación del suelo de tipo físico, que implica el desprendimiento del suelo y/o fragmentos de roca (Lal y Stewart, 1990 en López, 2002). Si bien es cierto que algunos procesos de erosión han obedecido a la configuración de variables naturales, la gran mayoría, son el resultado de las prácticas insostenibles del hombre sobre estas, que por presentar diferentes grados de resistencia a la acción erosiva, sólo determinan la velocidad y magnitud de degradación, dado al rápido incremento de los esfuerzos o por la reducción de la resistencia que ofrecen los materiales constituyentes del suelo (Wang y Sassa, 2003; Crosta y Frattini, 2008 en Aristizábal, 2008). Muestra de ello, son aquellas áreas que cuentan entre sus características físico-naturales: altas pendientes y geología de alta susceptibilidad a los agentes de meteorización, representan áreas con una mayor probabilidad de desarrollar procesos de erosión. Así lo da a entrever

Ferrer (1977) para la cuenca del Tórbes, en donde estipula como las áreas más críticas, las asentadas sobre la formación geológica de “La Quinta”.

Ambas formas de activación de los procesos de erosión, constituyen sucesos que la naturaleza, con elementos propios (bajo la reunión de un mínimo de requerimientos), es capaz de afrontar para restituir el equilibrio existente, desarrollando mecanismos de reforestación natural, como se ha evidenciado en áreas de los Alpes donde las prácticas agrícolas fueron abandonadas (Tasser et al., 2007), ó con reforestaciones inducidas por el hombre, como aquellas iniciadas en 1952, implantadas con la intención de recuperar áreas degradadas en los Andes venezolanos (Lucena, 1988) y que en buena parte de los casos, han estado fuera del alcance de un programa de evaluación y monitoreo planificado constante, que denote los verdaderos alcances de esta estrategia de recuperación.

En los últimos años, los procesos de erosión en laderas han representado un excelente campo para la investigación, sin embargo son pocos los estudios que han arrojado algún aporte en cuanto a la contribución y ubicación de los mismos, como lo asegura Martínez-Casasnovas et al. (2004), principalmente por la complejidad de cómo suelen presentarse, sumado a la falta de registros o la dificultad para realizarlos, la incipiente inquietud sobre el tema, el total desinterés, las limitaciones existentes de metodologías o tecnologías para desarrollar los registros en los distintos años o sencillamente por la falta de publicación o difusión de los trabajos realizados.

En Venezuela, la preocupación por los procesos de erosión y muy especialmente sus repercusiones, es poca, la misma puede datar su inicio, con la solicitud por parte del gobierno venezolano, de los servicios del Dr. Hugh H. Bennett, Director

del Servicio de Conservación de Suelos del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos en 1940, quién desarrolló estudios sobre los problemas de conservación de suelos, y paralelamente dictó cátedra a los técnicos venezolanos de la época, sobre métodos para el combate y mitigación de la erosión, con especial énfasis en la recuperación de laderas de las zonas montañosas (Bennett et al., 1942).

La situación, en cuanto a los problemas de erosión, se hace más entendible si se compara con el de otras latitudes, así lo sugieren las observaciones realizadas en 1946 por el Sr. William Vogt, Técnico norteamericano, Especialista en la Conservación y Aprovechamiento de los Recursos Naturales (citado por Hopf, 1972) quien en su visita al país expresó muy concluyentemente lo siguiente:

“Durante los 20 años que llevo estudiando el aprovechamiento y conservación de los suelos, en viajes a 14 Naciones, desde el Norte de Canadá hasta el estrecho de Magallanes, jamás se me había presentado un caso más complicado de desajuste nacional de la tierra, ni un caso patológico más difícil de curar como el que encontré en Venezuela” (p. 3).

Al occidente del país, especialmente en los Andes, existen variadas muestras de procesos de erosión, destacando entre ellos, los manifestados en la micro-cuenca “La Machirí”, ubicada al noreste de la ciudad de San Cristóbal, en los municipios Cárdenas y San Cristóbal del Estado Táchira, que reunió para su iniciación y desarrollo, las condiciones de fragilidad ambiental: altas pendientes y geología de alta meteorización como principales aspectos físico-naturales, y de intervención antrópica: deforestación, pastoreo, entre otros, como señalaron Hopf (1972), Finol (1972) y Ferrer (1977). Dicho proceso ha contado con una amplia gama de estudios

para conocer el fenómeno o para solventarlos, como ha sido el caso de pasantías o proyectos desarrollados por el propio Hopf (1972), Bello y Guerra (1975), Uzcátegui (1975), Montoya (1976) y Rojas (1977) de la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad de Los Andes, que han constituido un excelente aporte para la comprensión del mismo. Sin embargo, el estudio de los procesos de erosión en “La Machirí” ha mostrado como principal limitante, la falta de registros o el desarrollo de informes especulativos o de poca profundidad, que ha restado la comprensión del fenómeno y por ende del impacto de las medidas conservacionistas que allí se han propuesto, condenando en buena parte dichos trabajos a simples ejercicios teóricos o al fracaso de muchas de aquellas que fueron implementadas.

El planteamiento central de este estudio, es analizar el origen, la evolución y el grado de los procesos de erosión allí existentes, y determinar posibles estimaciones sobre el volumen removido de su condición natural, pendientes y el tamaño de los abanicos de detritos, a partir de un enfoque de tres niveles, que comprende el uso de imágenes satelitales, fotografías aéreas y recorridos por el área en observación (Larsson y Strömquist, 1995), metodología que fue parcialmente sugerida en 1972, por Corpoandes, (refiriéndose a un estudio multi-temporal con base en fotografías aéreas) como potencialmente interesante para analizar las variaciones de la erosión (Ferrer, 1977) y que lamentablemente no se realizó dado a las limitaciones tecnológicas de la época en la que fue propuesta o la falta de continuidad de investigaciones alusivas a la micro-cuenca.

1.1. Objetivos

1.1.1. General

Evaluar la dinámica de los procesos generadores de volúmenes de suelo desplazados por procesos de erosión, mediante el estudio multi-temporal de fotografías aéreas e imágenes satelitales en la micro-cuenca torrencial “La Machirí” estado Táchira

1.1.2. Específicos

- Analizar las medidas y experiencias desarrolladas para la conservación y recuperación de la micro-cuenca “La Machirí” estado Táchira.
- Analizar el origen, evolución, estado, tipo y grado de los procesos de erosión presentes en la micro-cuenca torrencial “La Machirí”, estado Táchira.
- Elaborar la base cartográfica de los procesos de erosión presentes en la parte alta de la micro-cuenca torrencial “La Machirí” estado Táchira para el 2010.
- Caracterizar los procesos de erosión en la micro-cuenca torrencial “La Machirí”, San Cristóbal, Estado Táchira.

CAPITULO II

2. MARCO TEORICO

2.1. Consideraciones generales

Definido el problema de la erosión, señalando en forma a priori su evolución y presentado tanto el objetivo general y los específicos como metas propuestas a alcanzar, se hace perentorio establecer un marco teórico que sirva de base para la realización de dicha investigación. Por ende, se mostrarán las conceptualizaciones realizadas sobre los procesos de erosión, los factores que los desenlazan y los efectos que ocasionan; Se hará especial énfasis en los de características hídricas, por ser estos los procesos que imperan en el área de estudio: la micro-cuenca torrencial “La Machirí”.

Dentro de estas conceptualizaciones se señalan los tipos de procesos de orden hídrico, que se suscitan tanto en vertiente como en cauce, donde se explica con mayor ahínco los que acontecen en el primer escenario, justificado en la condición de ser éstas, las áreas fuentes de aporte de sedimentos y ser las que a su vez denotan los procesos de erosión en su mayor expresión: erosión concentrada o por movimientos de masa.

Acto seguido, se explica la importancia de realizar los estudios sobre los procesos de erosión en ladera, dado principalmente a las repercusiones negativas que éstos acontecen sobre el espacio, específicamente sobre los seres humanos y sus actividades, para continuar con breves explicaciones que señalen la esencia de las metodologías principales aplicadas para el estudio de dichos procesos: la percepción remota a partir de las fotografías aéreas e imágenes satelitales y la visita

a campo como recurso de constatación de la información obtenida, el uso de los sistemas de información geográfica y el sistema de posicionamiento global.

Del mismo modo se expuso ciertos estudios realizados y referidos a algunas de las características que desarrolló en el presente estudio, seguido de los antecedentes llevados a cabo sobre la micro-cuenca torrencial “La Machirí”; ésta además contó con su conceptualización de orden físico-natural y antrópico que define con mayor detalle lo que ha venido aconteciendo en dicho espacio.

El propósito de la articulación del marco teórico de referencia resulta evidente: dar al estudio una coordinación y coherencia de conceptos, proposiciones y métodos.

La **Figura 1**. Presenta el esquema del Marco Teórico, que sustenta la investigación.

www.bdigital.ula.ve

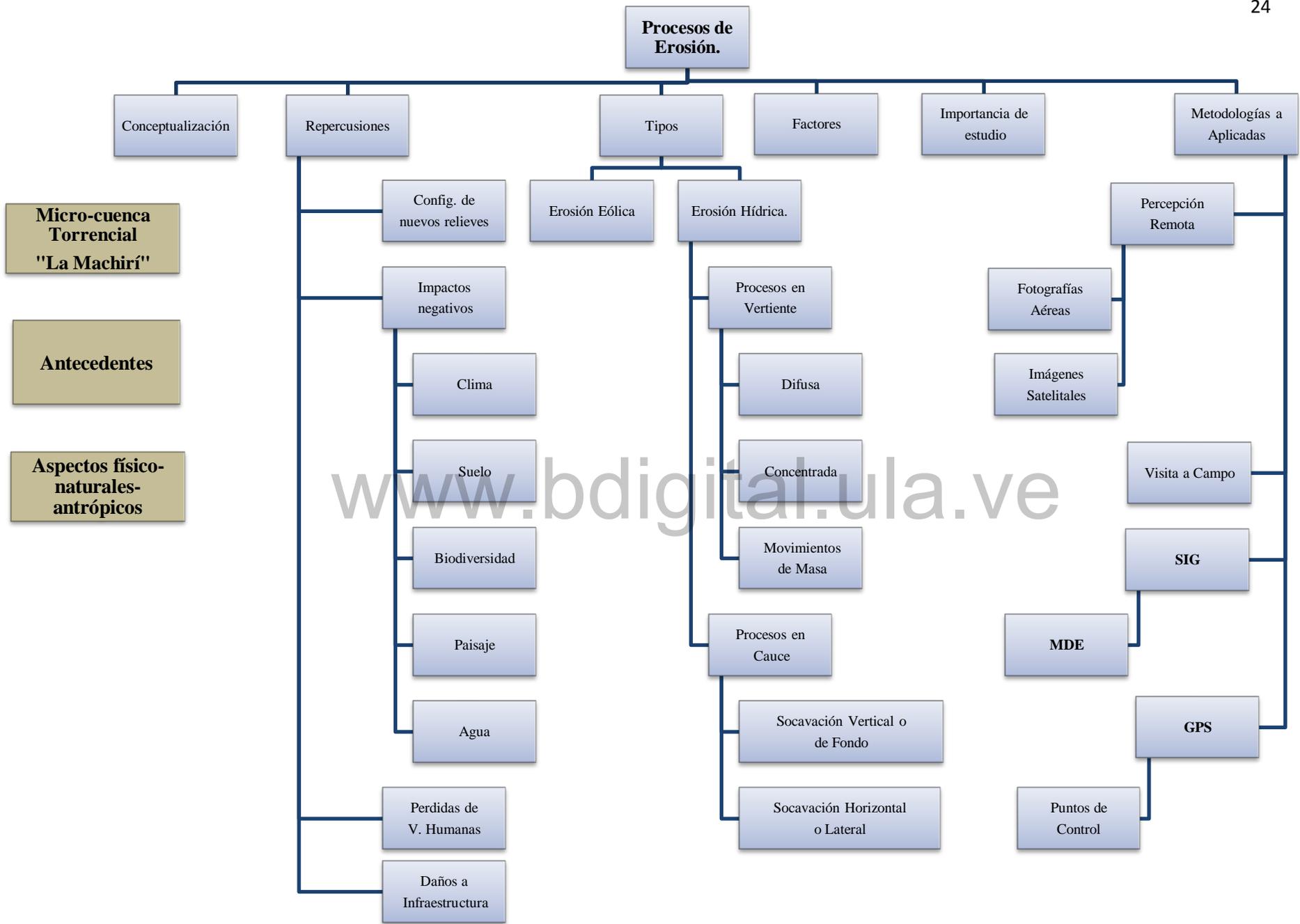


Figura 1. Esquema tentativo (Elaboración propia).

2.2. Definición de procesos de erosión

Alude a hechos concretos de orden dinámico en tiempo y espacio, que resulta en la degradación directa sobre el componente suelo, con repercusiones negativas para los demás constituyentes naturales: hidrografía, clima, biodiversidad y el valor exclusivo que pueda poseer un espacio como unidad de paisaje, al fomentarse la pérdida de material o la deforestación de la tierra como efectos *in situ* (Oldeman y Van Lynden, 1998 en López, 2002).

Barrios (1997) en términos generales señala que en los procesos de erosión pueden distinguirse tres macro-procesos básicos: desprendimiento de partículas de suelo, proceso avocado a las áreas de captación de una cuenca; transporte de partículas de suelo, que ocurre en dichas áreas de captación y a través de la garganta de la cuenca y la deposición de las partículas de suelo y/o otros materiales que encuentran reposo en los conos de deyección.

La erosión es un proceso de degradación del suelo de tipo físico, incluida según Lal y Stewart (1990) citado por López (2002), que implica el desprendimiento del suelo y/o fragmentos de roca, subdividida según su agente generador en dos formas generales: erosión eólica y erosión hídrica, esta última será tratada como eje de especial interés para este trabajo en las páginas siguientes. Una extensa explicación de los procesos de erosión eólica, aunado en los factores que los desencadenan aparece en Barrios (1997), Guevara (2000) y López (2002).

La erosión es un proceso que siempre ha estado ligado a la evolución fisiográfica de la corteza terrestre, existente incluso antes de que las civilizaciones humanas iniciasen su actividad (López, 2002). Sin embargo la aparición de dicha especie y sus prácticas, introdujo una dinámica transformadora más acelerada que

aquella de carácter geológico, mucho más lenta y efectiva en el tallado del relieve, aunque ésta puede presentar una tasa de erosión alta en lugares con depósitos jóvenes y blandos, vegetación escasa y lluvia torrencial, en oposición a aquellos que poseen depósitos viejos y endurecidos, rocas resistentes a la erosión y vegetación de buena cobertura (Barrios, 1997).

2.3. Repercusiones de los procesos de Erosión

Señalando la erosión geológica, sus repercusiones comprenden atributos benignos para el espacio, pues “contribuye a la formación del relieve, a los procesos de meteorización de las rocas y a la formación de los suelos. La continuidad de los declives en la superficie terrestre, las corrientes de agua con cauces normales definidos y bien adaptados a la configuración de los valles por donde corren los arroyos y los ríos que excepto en las crecientes siempre tienen sus aguas claras y limpias, son señales de erosión natural asociadas a la condición normal del paisaje” (USDA-SCSA (1996) en López, 2002).

Muy por el contrario, son las repercusiones de origen antrópico que según López (2002), “interfiere y rompe el equilibrio existente entre los suelos, la vegetación, el agua y el viento, dando origen a formaciones terrestres erosionales y otras condiciones anormales como las cárcavas o zanjas, los subsuelos descubiertos por la erosión laminar, derrumbes, carreteras socavadas y daños a otras edificaciones, lagos y reservorios colmatados y los cauces de los ríos obstruidos por sedimentos”, además de la constante posibilidad de la pérdida de vidas humanas como las acontecidas en Vargas, Venezuela, 1999, con alrededor de 15.000 víctimas, El lahar de Armero, Colombia ocurrido en 1985, con 23.000 víctimas y la

avalancha de roca y hielo/flujo de detritos de 1970 en el Nevado Huascarán, Perú donde perecieron 18.000 vidas (PMA:GCA, 2007).

Las repercusiones de los procesos de erosión, no sólo se evidencia in situ o inmediatamente aguas debajo de las zonas de pendiente, sino que también impacta (aunque no resulta inmediatamente perceptible) sobre los recursos marinos, a los cuales afecta por medio del transporte de sedimentos que asumen los ríos.

Según la revista internacional *Mazingira* de 1983 citado por Prieto (2008), los recursos marinos se ven afectados por los sedimentos ocasionados por prácticas agrícolas y grandes movimientos de tierra fomentadas por la expansión urbanística, que genera en las aguas marítimas: mayor turbidez, mayor concentración de nutrientes (principalmente de N y P), aumento del DBO y toxicidad (arrastre de productos químicos) que generan interferencia con los constituyentes normales del fondo que intervienen en el ciclo de la energía, al reducir la luz que llega a las plantas y fomentando la asfixia, muerte, repercusiones en el comportamiento de la fauna y contaminación del pescado.

Los procesos de erosión no sólo ponen en peligro directo, la vida de los poblados y sus habitantes, también compromete su seguridad alimentaria. La degradación acelerada de las tierras, y en particular del suelo, es considerada una de las mayores amenazas que se ciernen sobre el futuro de la humanidad (Delgado, 2004), pues con el transcurrir de los años la cantidad de tierras para la producción de alimentos, se ha ido reduciendo a un ritmo vertiginoso a tal punto que, desde los comienzos de la agricultura, más de la mitad de las tierras productivas del planeta se han perdido irreversiblemente, como lo asegura Dowdeswell (1998), citado por Delgado (2004).

2.4. Importancia de los procesos de erosión

El suelo es un recurso que después de perdido es muy difícil de reemplazar, toma de cientos a miles de años para desarrollar un perfil de suelo arable de cinco cm a través de los procesos de intemperismo de los materiales parentales y 500 años bajo condiciones de agricultura para la obtención de 2.5 cm de perfil de suelo. Pertinente es señalar que, más del 97% de los productos alimenticios proceden de la tierra y con una tendencia de aumento en las cuencas de gran pendiente en las regiones tropicales, donde los procesos de erosión son aún más graves (Guevara, 2000).

Si se observa la cantidad existente de tierras de ladera, con diferentes grados de pendiente, de acuerdo con Cook (1988) citado por Delgado (2004) éstas abarcan 400 millones de hectáreas sólo en los trópicos de América Latina y el Caribe, representando alrededor del 25% de la superficie total de la región, vislumbrando a primera vista, un porcentaje importante de hectáreas de suelos que están, han estado y pueden presentar tal tipo de degradación.

Venezuela no escapa a poseer un porcentaje potencialmente significativo para el desencadenamiento de procesos de erosión, si solo se toma exclusivamente como parámetro de análisis el factor pendiente. En la **Tabla 1** se hace evidente que casi el 45% de la extensión territorial presenta amplias áreas con pendientes mayores al 8%.

Tabla 1. Distribución de diferentes espacios fisiográficos en Venezuela (Delgado, 2009).

PAISAJE FISIOGRAFICO	Área Nacional	
	Km ²	%
Valles, Terrazas y Planicies (Pendiente 0-8%)	507.391	56
Colinas y Piedemonte (Pendiente 8-30%)	79.780	9
Montañas (Pendiente mayor a 30%)	315.909	35

Asumiendo como responsable principal de la erosión la intervención agrícola, de igual manera y como lo asegura Delgado (2004), estas prácticas son la principal causa de las altas cantidades de sedimentos que arrojan las cuencas de los más importantes ríos de las regiones del mundo, en donde destaca las del sudeste asiático como la región donde se presentan los valores más elevados.

Esta situación es generada por la ocupación de los suelos aptos para el desarrollo agrícola por otros usos, sea urbanístico, industrial y ganadero, entre otros, para los que suelos de menor calidad resultan más idóneos, que sumado al crecimiento poblacional y su firme necesidad de alimentación, ejerce presiones sobre tierras menos óptimas para la obtención de productos alimenticios, como las laderas.

La degradación de los suelos en 2008, se encontraba en el 11% de la tierra del planeta con una tendencia al aumento, ocasionado por los químicos, la erosión y el sobreuso, según el informe del programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (Prieto, 2008).

La necesidad de ofrecer seguridad alimentaria, es el imperativo que debe prevalecer para desarrollar investigaciones y estrategias que ayuden a reducir los

efectos de los procesos de erosión, esto sin menospreciar la meritoria protección de los cauces que reciben o han de recibir sedimentos que disminuyan sus propiedades físicas y químicas requeridas por las poblaciones en sus diversas formas de utilización.

2.5. Definición de erosión hídrica

Prieto (2008) señala que la erosión hídrica es la causada por las aguas de lluvia al caer sobre terrenos desnudos y que en su escurrimiento por terrenos pendientes arrastran el suelo para depositarlos en zonas bajas e ir a enlodar y obstruir las fuentes de agua.

López (2004) explica que los procesos de erosión son posibilitados gracias a la denudación que sufre el suelo, condición que ocurre al remover la cobertura vegetal productora por el laboreo para el cultivo, la quema de los residuos de la cosecha, el sobrepastoreo, la deforestación y la disturbación drástica del suelo por el uso de maquinaria pesada en la construcción de vías, obras, desarrollo de minería, labores agrícolas y forestales.

2.6. Descripción de los tipos de procesos de erosión

López (2002) explica qué tradicionalmente ha existido una clasificación de las diversas formas de expresión de la erosión ocasionada por el agua, basada en la progresiva concentración del escurrimiento superficial, que omite la erosión por salpicadura o impacto de la gota de lluvia, la cual ha sido reconocida como la primera y más importante fase en el proceso de erosión hídrica. En la aplicación de medidas estructurales para el control de la dinámica torrencial en cuencas hidrográficas, la erosión se ha clasificado atendiendo al lugar donde acontecen:

procesos en vertiente y en cauce (Vidal, 2009), asumiéndose la erosión por salpicadura como un hecho presente en ambos casos.

Guevara (2000) por su parte presenta un resumen de los tipos de erosión, fomentado el agente erosivo que desencadena el proceso, logrando de este modo una clasificación exhaustiva y completa.

Otros problemas que se han suscitado al clasificar los tipos de erosión, es lo concerniente a la erosión laminar, que sugiere erróneamente el hecho de que el suelo es removido uniformemente en láminas delgadas (Hudson, 1981 en López, 2002) cuando verdaderamente lo que ocurre es la formación de diminutos surcos prácticamente de modo simultáneo (Guevara, 2000) constituyendo una remoción más o menos uniforme de una delgada capa de partículas de suelo (Barrios, 1997).

Con ánimo de abarcar la complejidad de los procesos de erosión, este estudio presenta una clasificación basada en la localización donde se desenvuelven los mismos, tomando en cuenta las consideraciones y sugerencias de los trabajos realizados por Barrios (1997), Guevara (2000), López (2002) y Prieto (2004) (Figura 2).

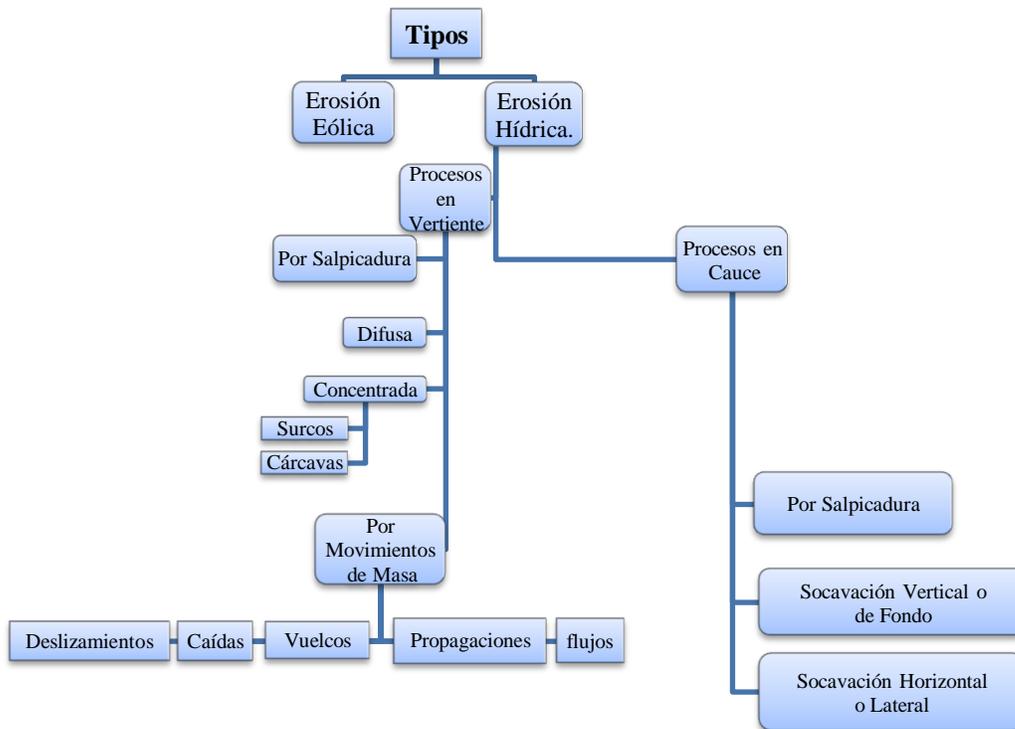


Figura 2. Tipos de erosión. (Elaboración propia).

2.6.1. Descripción de los procesos de erosión en vertiente

2.6.1.1. Por salpicadura

También denominada pluvial (Barrios, 1997 y López, 2002), es el resultado producido por el impacto de la gota de lluvia sobre el suelo desnudo, las cuales al caer a diversas velocidades y contar con diversos diámetros, liberan energía variable capaz de desprender partículas constituyentes del suelo, dispersándolas y propiciando el inicio de la erosión por escurrimiento (Barrios, 1997; Guevara, 2000; López, 2002 y Prieto, 2004).

Este proceso es evidente principalmente en zonas de ladera, aunque puede presentarse en zonas llanas, donde si bien es cierto ocurre erosión, se produce un proceso de enlodamiento al no ocurrir el arrastre de las partículas, generándose encostramiento del suelo (López, 2002).

2.6.1.2. Difusa

Alude al concepto de erosión laminar, que sugiere que el suelo es removido uniformemente por el flujo uniforme de laminas delgadas de agua (Hudson, 1981 en López, 2002), aunque los estudios realizados con fotografías aéreas señala que ese proceso idealizado ocurre raramente (Guevara, 2000). Barrios (1997) denomina a la erosión laminar como intersurcos, microsurcos o canalículos, por su parte Bergsma et al. (1996) en López (2002) sugiere definir indistintamente la erosión como entre surcos o erosión difusa. Sea cual fuese el caso esta forma de erosión es una de las más peligrosas y traicioneras, pues se viene a notar cuando solo queda una capa delgada de suelo, las raíces se ven desnudas o aparece el subsuelo (Prieto, 2004).

2.6.1.3. Concentrada

Se inicia cuando la escorrentía se concentra en las pequeñas depresiones superficiales (Guevara, 2000) por lo que autores como Sharma (1996), Grissinger (1996), Loflen y Roose (1998) citados por López (2002), proponen denominarla erosión en canales, conformada por la erosión por surcos y por cárcavas.

2.6.1.3.1. Por Surcos

Ocasionada por el escurrimiento concentrado de agua en surcos pudiendo presentarse agrupados en paralelo o independientes y durables (Prieto, 2004), con la factibilidad de aportar descargas considerables a los canales vecinos (López, 2002). Los surcos pueden eliminarse por labores de labranza (Barrios, 1997 y Guevara, 2000).

2.6.1.3.2. Por Cárcavas

Barrios (1997) y López (2002) señalan que este proceso ocurre cuando hay una mayor concentración de la escorrentía sobre los surcos, profundizándolos, ensanchándolos o permitiendo la unión de los mismos, formando zanjas o zanjones (Prieto, 2004) llamadas cárcavas. Este proceso puede presentarse como erosión regresiva hacia aguas arriba del punto de origen del carcavamiento (Guevara, 2000). Las cárcavas, por presentar mayores dimensiones que los surcos transportan agua tanto durante la tormenta, como después de culminada ésta. En cuanto a la producción de sedimento, esta es normalmente menor que la que ocurre por el conjunto de erosión laminar y por surcos, aunque esta tasa puede variar dependiendo de los factores presentes en las zonas donde se manifieste este tipo de erosión (Guevara, 2000). A diferencia de los surcos, las cárcavas no pueden ser eliminadas por las labores de labranza dado al gran tamaño que presentan.

2.6.1.4. Por movimientos de masa

El término movimiento de masa incluye todos los movimientos ladera abajo de una masa o roca, de detritus o de tierras por efecto de la gravedad (Cruden, 1991 en Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas, 2007); también es conocida como erosión por remoción en masa (Prieto, 2004), siendo el resultante de la acción del agua de infiltración, los desequilibrios del suelo y el efecto de la gravedad (Barrios, 1997 y López, 2002). Términos como “procesos gravitacionales”, “procesos de ladera” y “movimientos de ladera” son empleados correcta y ampliamente como sinónimo de procesos de remoción, aunado a la propuesta: “movimiento del terreno” como una traducción al término inglés: landslide (Alcántara, 2000); Dichos procesos pueden, como asegura el

Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas (2007), ser lentos, imperceptibles y difusos o manifestarse con altas velocidades y límites claros, determinados por superficies de rotura.

Existen muchas clasificaciones de movimientos de masa, sin embargo, el sistema propuesto por Varnes en 1978 es uno de los más utilizados a nivel mundial. Investigaciones desarrolladas por el Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas (2007), Aristizábal (2008), Moreiras et al. (2008) así lo demuestran. Este método emplea como criterio principal de clasificación, el tipo de movimiento y en segundo lugar el material, resultando de este modo cinco tipos de movimiento de masa: caídas, vuelcos, deslizamientos, propagaciones y flujos que pueden ser de dos clases de materiales: rocas o suelos (Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas, 2007 y WP/WLI, 1993 en Aristizábal, 2008). (Tabla 4). Una descripción detallada de los tipos de movimiento en masa se puede encontrar en Barrios (1997), Alcántara (2000), López (2002), Prieto (2004) y Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas (2007).

Cualquiera que sea la clasificación adoptada, lo sustancial es entender a los movimientos de masa en sí mismos: localización, forma y dimensiones, los factores que intervinieron o intervienen, la dinámica del movimiento, magnitud, distribución de velocidades y la distancia que la masa podría alcanzar una vez puesta en movimiento, así lo aseguran los múltiples estudios compilados por INGEOMINAS (2002).

2.6.2. Descripción de los procesos de erosión en cauce

2.6.2.1. Por Salpicadura

Hace referencia al impacto de las gotas de lluvia sobre superficies de agua muy finas y consiste en el desgarramiento y transporte de las partículas que constituyen el fondo. Aunque el impacto de las gotas sobre las corrientes profundas puede no ocasionar salpicadura si aumenta la turbulencia y por ende de la capacidad del transporte del flujo (Guevara, 2000).

2.6.2.2. Socavación Vertical o de Fondo

Consecuencia del aumento del volumen y velocidad del caudal (Guevara, 2000), otorgándole mayor capacidad de desprendimiento del lecho, propiciado por la deforestación de los bosques existentes en las laderas que altera la regularidad de las corrientes o caudales (Guevara, 2000; Badilla et al., 2003 y Prieto, 2004).

2.6.2.3. Socavación Horizontal

Causada por la pérdida de la vegetación ribereña debido al sobrepastoreo y labores agrícolas en las proximidades del cauce (Guevara, 2000), que fomenta un debilitamiento directo sobre las riberas, que también pueden verse afectadas de modo indirecto por la deforestación de zonas más alejadas a las mismas, como son secciones de laderas situadas en las partes altas de las micro-cuencas (Alvarado y Encinales, 2002), Estas prácticas alteran el régimen del caudal haciendo que este se vuelva irregular.

Debido a que los cauces desde su nacimiento hasta su desembocadura buscan como forma final una curva parabólica y una disminución constante de su caída (Prieto, 2004), se configuran en las curvaturas de estos, puntos críticos donde se

manifiesta un tipo de erosión continua; no se descarta que la erosión pueda presentarse en secciones reducidas y rectos de cauces o en secciones donde se evidencia la intervención de elementos introducidos por el hombre, como puentes, descargas de alcantarillas y sistemas de drenaje (Guevara, 2000). Según Alvarado y Encinales (2002) la socavación de este tipo, suele presentarse principalmente en épocas de intensas lluvias, que puede generar crecientes máximas con aportes de cargas sólidas y alcanza a coadyuvar también, al debilitamiento significativo de las laderas por escurrimiento, agrietamiento o fisuras que, dependiendo del ciclo de humectación-secado y dado al tipo de material involucrado, logran transmitir lentamente un debilitamiento a la misma.

2.7. Experiencias en el análisis de procesos de erosión

2.7.1. Uso de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y de los Sensores Remotos en el estudio de los procesos de erosión

Los estudios de los procesos de erosión, al igual que otros campos dentro de las áreas del saber geográfico o ambiental, ha estado a la par conforme a como se han dado los avances tecnológicos, así pues el hacer científico ha pasado de los procedimientos manuales, laboriosos de orden analógico sobre papel a procesamientos rápidos digitales, como el que ha fomentado los ordenadores modernos.

Existe una gran cantidad de enfoques cuyo objetivo es la cuantificación e inclusive la simulación de los procesos de erosión, especialmente sobre la dinámica, forma, volumen removido en tiempo y espacio, origen, entre otros. Dichos enfoques podrían clasificarse en cuatro grandes categorías esbozadas a grandes rasgos, la primera de ellas, encargadas de realizar estudios de observación

sobre las propias áreas donde ocurre la erosión, muestra de ellos los estudios fotogramétricos de Larsson y Strömquist (1995) en África meridional (basado en imágenes satelitales y fotografías aéreas), la segunda categoría simula lo que ocurre cuando hay presencia de procesos de erosión mediante el uso de parcelas que controlan las variables pendiente, tipo de suelo, cobertura y pluviosidad, en laboratorios destinados exclusivamente para ello, ejemplo, el estudio desarrollado en el municipio Uberlândia, Brasil (Junior et al., 2008), tercera, los métodos de cuantificación directa basada a partir del uso de estaca y/o levantamientos de perfiles altamente detallados de la topografía (Martínez-Casasnovas et al., 2001), y por último los que se hayan insertos plenamente bajo la forma de programas de computación que recogen y traducen los datos bajo las teorías y criterios científicos comprobados por los círculos de expertos en la materia.

Los SIG pertenecen a esta última categoría, siendo su gran capacidad de representación, análisis y ahorro de tiempo su sello distintivo; procesos laboriosos como la preparación de datos de entrada para el desarrollo de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo conocida por sus siglas en inglés como USLE por ejemplo, realizados de modo analógico, en la actualidad se han visto significativamente reducidos en cuanto al empleo del tiempo.

El uso más común de los SIG, ha versado principalmente en la capacidad que tiene de elaborar Modelos Digitales de Terreno (MDT), definidos como la representación simplificada de un hecho complejo como lo es la topografía presente en un área determinada (Bosque, 1992).

Los MDT han sido muy útil en:

- Calcular la pendiente del área que contribuye a la erosión y a su inicio.

- Obtener umbrales de barrancos para la iniciación y deposición de sedimentos y por último para localizar cárcavas incipientes en el paisaje.
- Tomar en cuenta el retroceso de las cabezas o coronas de los barrancos y cárcavas atendiendo a la morfología.
- Estudiar la contribución de los sedimentos, la producción de tasas de expansión volumétrica y los procesos relacionados con activos.

(En Martínez-Casasnovas et al., 2004).

Un caso no muy lejano de la utilidad de los DEM, lo constituyó la generación de un mapa de sectores de pendiente para la delimitación tomando en cuenta el ángulo de fricción interna teórico de los materiales que componen las vertientes donde se suscitó el abanico El Palón, en el estado Mérida-Venezuela (Ayala, 2005).

Bosque (1992), señala también que en una superficie ondulada “tridimensional” como la generada por el DEM, resulta interesante obtener el volumen como valoración de magnitud geométrica, en especial de la situada bajo la superficie ondulada. Según el autor la operación se puede ampliar al cálculo del volumen entre dos superficies onduladas, por ejemplo, la de un DEM real y otro que existiera de llevar a cabo una obra, como la construcción de una carretera, de este modo, se hace posible conocer el volumen de tierras que es preciso mover (tanto para mover para vaciar porciones del terreno o para rellenar otras), el mismo procedimiento ha sido aplicado para conocer el volumen removido por procesos de erosión en las laderas de las montañas.

La calidad y la precisión de la información relacionada con la estimación de valores por erosión, dependen de que el DEM debe representar el terreno de la

manera más exacta posible, ya que la precisión de un DEM determina la fiabilidad del análisis morfométrico (Lobo y Ulrich, 2008), pues como explica Schenk (2002), los DEM pueden presentar problemas, y más aún si son generados de modo automático a partir de fotografías aéreas u imágenes satelitales. La Conclusión resulta evidente, de un buen DEM se puede generar una excelente comprensión de las amenazas que pueden representar los deslizamientos a las poblaciones que se hallen cercanas a estos procesos.

2.7.2. Antecedentes

CORPOANDES (1972a) estableció una clasificación para diversos grados de erosión, a partir de la revisión de fotografías aéreas y recorridos de campo en la Sub-Región Grita-Tórbes. De igual manera realizaron observaciones sobre las cargas sólidas depositadas o removidas de los lechos; La clasificación desarrollada comprendió las clases: normal, débil, moderada, fuerte, muy fuerte, grave y excesiva, siendo estas dos últimas las clases que involucran las cárcavas y barrancos con profundidades mayores a 1 m.

Larsson y Strömquist (1995) señalaron que con la introducción de las imágenes generadas por los satélites, se posibilitó el desarrollo de técnicas de inventario y monitoreo ambiental, denominado *enfoque de tres niveles*, consistiendo su primera etapa, en el estudio de imágenes satelitales para la identificación y delimitación de áreas o lugares de interés. A fin de obtener una visión más detallada, se estudian las fotografías aéreas en una segunda etapa, que indica un número de áreas limitadas, para ser inspeccionadas como fase final del enfoque, en campo, dependiendo del tipo de información a requerir.

Dichos autores probaron varias combinaciones de imágenes SPOT con el fin de cartografiar la erosión del suelo, aplicando el sistema desarrollado en África Meridional denominado SARCCUS (Southern African Regional Committee for the Conservation and Utilisation of Soil), para la clasificación de la erosión basada en fotografía aéreas en las tierras bajas de Lesotho, pudiendo determinar cinco clases de erosión laminar. En cuanto la erosión en cárcavas los autores incluyen la clasificación propuesta por SARCCUS en 1981.

Un estudio a nivel de parcela (escala 1:200) con la inclusión detallada de los DEM, fue realizada en un ambiente mediterráneo (Cataluña, España), por Martínez-Casasnovas et al. (2001), para analizar los procesos de erosión desencadenados antes y después de un evento de precipitación extrema, pudiendo a partir de la diferencia de volumen encontrada en los DEMs, establecer una cartografía de áreas removidas y áreas donde hubo deposición.

Alvarado y Encinales (2002), lideraron una comisión técnica que se desplazó el 21 de enero de 2002 al poblado Guayabal, como respuesta al llamado realizado por la Alcaldía Municipal de Guayabal de Síquima en el Departamento de Cundinamarca (Colombia), para que emitiera un “concepto técnico” sobre la situación de socavación del río Síquima en áreas aledañas al casco urbano, que había puesto en situación de riesgo a las viviendas ubicadas en el sector. Dicha comisión presentó un informe sobre la problemática existente, que a su vez constituyó una continuidad al “concepto técnico” de 1991 y al “Inventario de Amenazas Geológicas” de 1992 desarrollados por INGEOMINAS anteriormente en dicha área.

INGEOMINAS (2002), presentó una guía metodológica que permite lograr zonificaciones de amenaza desde una perspectiva regional y una estimación de las pérdidas físicas probables, generadas por la materialización de dichas amenazas, en zonas urbanas relativamente pequeñas y que a su vez pueda constituirse en un instrumento metodológico que pueda contribuir a la reducción de desastres por fenómenos de erosión en masa y avenidas torrenciales.

Badilla et al. (2003), dada a las continuas inundaciones acaecidas en la ciudad de Turrialba (Costa Rica), se trazaron como objetivo principal de estudio, evaluar la amenaza de inundación y las causas que las originaban, para ello se basaron en el estudio de las características geomorfológicas, climatológicas y urbanas del área complementadas con la escasa información disponible relacionada con la ocurrencia y las características de los eventos históricos. Señalaron en su trabajo que este método de evaluación representa una alternativa en áreas donde, por escasez de datos, resulta imposible llevar a cabo estudios estadísticos o hidrológicos y modelaciones hidráulicas. A groso modo su método incluye: trabajo de campo, revisión bibliográfica (centrada en el uso dado al suelo, eventos históricos y los estudios hidrológicos realizados en la zona), interpretación de fotografías aéreas e imágenes satelitales, y la generación de diversos mapas mediante la aplicación de SIG.

Martínez-Casasnovas (2004) desarrolló un estudio al norte de España, sobre los procesos de erosión utilizando la creación de modelos digitales de elevación para diversos años derivados de fotografías aéreas a escala de 1:5000 a 1:7000, para ello se basó en la utilidad de los DEM para calcular la pendiente del área, la obtención de umbrales de barrancos para la iniciación y depósito de sedimentos en procesos de erosión, localización de cárcavas incipientes sobre el paisaje, análisis del

retroceso de las cabezas o coronas de las cárcavas, contribución de sedimentos y la expansión volumétrica de los procesos activos.

El estudio desarrollado por el autor citado consistió en definir dos MDE para dos intervalos de tiempo (1975-1995 y 1995-2002) con un metro de resolución derivado de la interpolación espacial de datos de altitud de las fotografías aéreas tratadas previamente con restitución fotogramétrica digital.

Aristizábal (2008) realizó una caracterización, determinación del origen y dinámica de los movimientos de masa ocurridos el 31 de mayo de 2008 en el barrio El Socorro de Medellín, Colombia; en dicho estudio logró estimar el volumen del material desprendido, inicialmente como la mitad del volumen de un elipsoide, método propuesto por Beyer (1987), Cruden y Varnes (1996) citados por Aristizábal (2008), atendiendo no solo a las dimensiones de los procesos de erosión sino también al porcentaje de dilatación que tienen los materiales constituyentes. A su vez se recopilaron inventarios de desastres que permitieron dimensionar la problemática de los movimientos de masa.

Moreiras, Lenzano y Riveros (2008) desarrollaron un inventario de procesos de remoción de masa en el parque provincial Aconcagua, provincia de Mendoza – Argentina, identificándose 400 eventos clasificados en caídas de rocas, flujos de detritos, zonas de flujos de detritos, deslizamientos y eventos complejos clasificándose eventos en función del tamaño de los depósitos por razones de escala en: eventos cuyo Largo total (Lt) fuese igual o mayor a 1.000 m; b- flujos menores ($Lt < 1.000$ m); y c- zona de flujos de detritos correspondientes a flujos menores pero que cuyas concentraciones en determinados sectores fuera importante. Los procesos con un $Lt \leq 1.000$ m fueron clasificados de acuerdo al Glosario

Internacional desarrollado en 1993 por el Grupo Internacional de Trabajo para el Inventario Mundial de Movimientos del Terreno (en inglés: Working Party on the World Landslide Inventory, conocido por sus siglas: WP/WLI) de la UNESCO (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura) que contempló principalmente el tipo de movimiento y el tipo de material involucrado en el movimiento en función a lo establecido inicialmente por Varnes en 1978, citado por Moreiras et al.(2008).

El objetivo principal de dicho informe fue la de generar un concepto técnico acerca de dichos procesos y sus incidencias, así como fungir como soporte para la toma de decisiones en materia de prevención de desastres y en la generación de conclusiones y recomendaciones generales a corto y largo plazo, en cuanto al manejo de la cuenca y de los recursos que la integran.

2.7.3. Método de clasificación de los procesos de remoción

Clasificados de acuerdo al Glosario Internacional de WP/WLI desarrollado en 1993, según este glosario El tipo de movimiento puede ser caída, deslizamiento, flujo y eventos complejos caracterizados por la combinación de características de los demás movimientos, iniciando generalmente con un tipo y terminando en otro (Moreiras et al., 2008) (Tabla 2).

Tabla 2. Clasificación de los procesos de remoción en masa modificada de Varnes, 1978 en Moreiras et al., 2008).

TIPO DE MOVIMIENTO		TIPO DE MATERIAL			
Caída (fall)		Roca		Suelo	
Vuelcos (topples)		Vuelcos (topples)			
Deslizamiento (slide)	Rotacional	Asentamiento (slumps)			
	Planar	Deslizamientos de roca (slides)			
Flujo (flow)		Inconsolidado			
		Húmedo...Seco	Bloques	Detritos	>50% arena, limo y arcilla
			Flujo de escombros (<i>rock fragment flow</i>)	Flujo de detritos o derrubio (<i>debris flow</i>)	Flujo de barro (mudflow)
Desplazamientos laterales		Blocosos	Suelos		
Deslizamientos complejo (complex landslide)		Combinación de materiales y tipo de movimiento			

2.7.4. Herramientas para el Análisis Exploratorio de Datos Espaciales

Comprende un conjunto de herramientas, principalmente de tipo gráfico, con las que se exploran los datos antes de usar técnicas de interpolación. Los objetivos del análisis exploratorio en líneas generales son:

- Examinar la distribución de los datos.
- Detectar valores extremos locales y globales.
- Buscar tendencias globales.
- Examinar la autocorrelación espacial y variación direccional de los datos.
- Entender la covariación entre múltiples variables.
- Realizar transformaciones de los datos si son requeridas.

El Análisis Exploratorio de Datos Espaciales permite investigar gráficamente los datos para un mejor conocimiento de los mismos (Moreno, 2008).

Entre las herramientas aplicadas está el histograma, el mapa de polígonos de Thiessen (también conocido como Voronoi) y el gráfico de probabilidad normal Q-Q (Moreno, 2008).

2.7.4.1. Histograma

Permite una descripción univariada de los datos. Presenta una distribución de frecuencia la cual se representa mediante una serie de barras donde se agrupan los valores observados en un determinado número de clases o intervalos. La altura de cada barra representa la frecuencia absoluta (Moreno, 2008).

2.7.4.2. Polígonos de Thiessen

Es el método más simple de interpolación entre todos los existentes en un SIG, cuyo principio se basa en admitir que cada punto no muestral se parece, más que ningún otro, al punto muestral más próximo (Bosque, 1992). Comúnmente es usado por la hidrología para conocer la altura media de la precipitación sobre una zona determinada para un periodo de tiempo en específico (Bastidas, 2007), también puede ser empleado para interpolar alturas topográficas (Bosque, 1992).

La construcción de los polígonos parte de unir primeramente los puntos que expresan un valor en el espacio a través de rectas; las perpendiculares en los puntos medios de estas rectas de unión forman polígonos alrededor de cada uno de los puntos (Bastidas, 2007), construyéndose de este modo los polígonos requeridos.

2.7.4.3. Gráficos de probabilidad normal Q-Q

Representan los cuantiles reales y teóricos de una distribución normal. Los valores correspondientes a una distribución normal vienen representados por la recta y los puntos son las puntuaciones reales de los individuos, valores observados

frente a los esperados que serían los de una recta. Este gráfico es utilizado para comparar el grado de semejanza en la distribución de los valores de dos conjuntos de datos (Moreno, 2008).

2.7.5. Análisis geoestadístico de puntos.

2.7.5.1. Análisis de Mínima Distancia

Determina simplemente la distancia media euclidiana, el valor máximo y el valor mínimo de distancia, la desviación estándar y la presencia o no de puntos duplicados (Conrad, 2010).

2.7.5.2. Análisis de patrones espaciales

El Análisis de Patrones Espaciales señala el centro de los puntos, la distancia estándar (a través de un radio de distancia media) y un recuadro de alcance espacial de los puntos estudiados (Conrad, 2010).

2.7.5.3. Variograma

Es una técnica estadística que permite realizar análisis de la varianza, su propósito es medir los niveles de diversos factores (variable independiente) sobre una característica, medida a través de una o más variables cualitativas conocidas como dependientes (Tapia, 2007). De este modo, se logra describir la variabilidad espacial de un fenómeno, respondiendo a la pregunta ¿Qué tan parecidos son los puntos en el espacio a medida que estos se encuentran más alejados? (Gallardo, 2006).

Para construir el semi-variograma empírico, se representa en el eje Y la mitad de las diferencias al cuadrado entre cada par de lugares (semivarianza) y en el eje X

la distancia que los separa, esta se calcula automáticamente utilizando la forma de la distancia euclidiana (Moreno, 2008).

Según Moreno (2008), la semivarianza empírica se obtiene, al hallar la diferencia entre los valores de dos lugares, se eleva al cuadrado y se multiplica por 0,5. Destaca el promedio, porque es agrupar las distancias en un determinado número de intervalos, luego se halla el promedio de las distancias y el promedio de las semivarianzas entre todos los pares de lugares que hay en el mismo intervalo, que finalmente es representado por un punto en el semivariograma.

Según Olaya (2011), La semivarianza es una medida de la autocorrelación espacial de una variable x entre dos puntos i, j puesto que puede calcularse la distancia entre dichos puntos, pueden representarse los valores de γ frente a las distancias h . Se obtiene una nube de puntos (nube del variograma) (Figura 3).

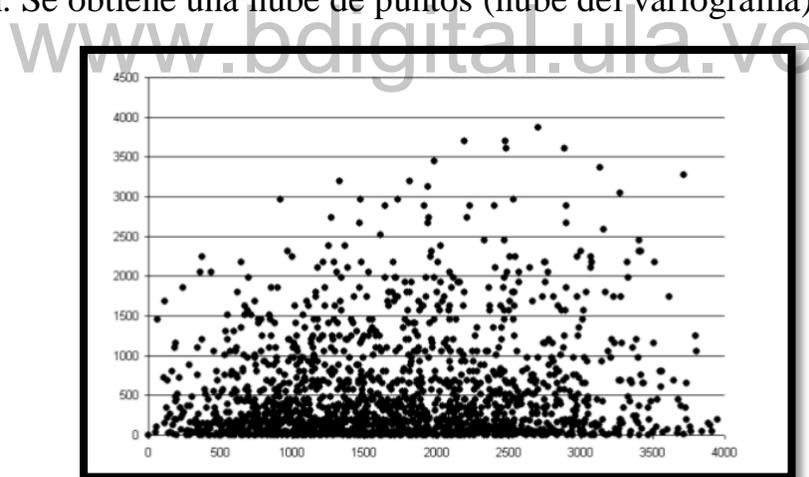


Figura 3. Representación de valores de semivarianza frente a distancia, formando la nube del variograma (Fuente: Olaya, 2011).

2.7.5.4. Superficie Variográfica

La Superficie variográfica, tiene por objetivo explorar y cuantificar la dependencia espacial de una variable, es decir su “autocorrelación espacial”, la cual asume que las cosas que están más cercas son más parecidas que aquellas que se

hallan más lejos, asumiéndose además el principio de estacionariedad que consiste en que si dos lugares están a una distancia y dirección similar tendrán diferencias al cuadrado entre sus valores (estacionariedad de 2do orden) (Moreno, 2008).

Este módulo genera tres superficies de tipo raster (Conteo de datos, varianza y covarianza) los cuales funcionan para evaluar la isotropía y la anisotropía de los datos, para ello, utiliza un mapa de puntos (o mapa raster) y calcula una superficie de valores de semivarianza, donde cada pixel en la superficie representa una clase de distancia direccional. Esta superficie permite determinar visualmente la dirección de una posible anisotropía (H e R Indser, 2000).

La isotropía es el término usado para señalar que la autocorrelación espacial sólo depende de la distancia entre dos lugares, y la anisotropía cuando la correlación varía según la dirección elegida (Moreno, 2008).

Normalmente el semivariograma representado como una superficie debe ser circular (baja varianza cerca del origen, color azul) y alta varianza (color rojo, hacia afuera) (H e R Indser, 2000).

Estas superficies no son mapas como tales (la superficie variográfica a partir de una capa raster no tiene las mismas coordenadas que esta. De hecho, no tiene coordenadas absolutas en el espacio), sino que, respecto a un punto central en el cual la variación es lógicamente cero, expresan en cada celda el valor medio que se da a la distancia y dirección que dicha celda define respecto al punto central (Olaya, 2011).

CAPITULO III

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Ubicación del área de estudio

La micro-cuenca torrencial “La Machirí” se encuentra al noreste de la ciudad de San Cristóbal, geográficamente se halla entre las longitudes $72^{\circ} 10'$ y $72^{\circ} 13'$ Oeste y entre las latitudes $7^{\circ} 47'$ y $7^{\circ} 49'$ Norte (Figura 4). Desde la concepción político-administrativa pertenece a los municipios Cárdenas y San Cristóbal respectivamente, tiene una extensión aproximada de 20 km^2 , con 10 km de Largo y 4 km de ancho máximo. Su altitud varía entre los 800 m.s.n.m. en la desembocadura en el Río Tórbes y los 2.214 m.s.n.m. en el Pico “El Oso” (Hopf, 1972). Lo que denota una diferencia altitudinal considerable de 1.400 m, que juega un papel determinante en la conformación de la dinámica de los procesos de erosión que allí se desarrollan.

Fundamentalmente, dicha micro-cuenca torrencial ha sido subdividida (Hopf, 1972; Uzcátegui, 1975; Bello y Guerra, 1975) en tres partes:

Subcuenca “La Machirí”: la de mayor extensión, comprende a su vez las siguientes partes:

- Micro-cuenca “Los Pinos”: presenta tres cárcavas importantes: El Araque, El Medio y El setenta.
- Micro-cuenca “El Toro”: presenta la cárcava denominada con el mismo nombre.
- **Subcuenca “La Cachicama”:** en ella se halla la cárcava que responde a la misma denominación.
- **Subcuenca “La potrera”:** micro-cuenca “La Osa”

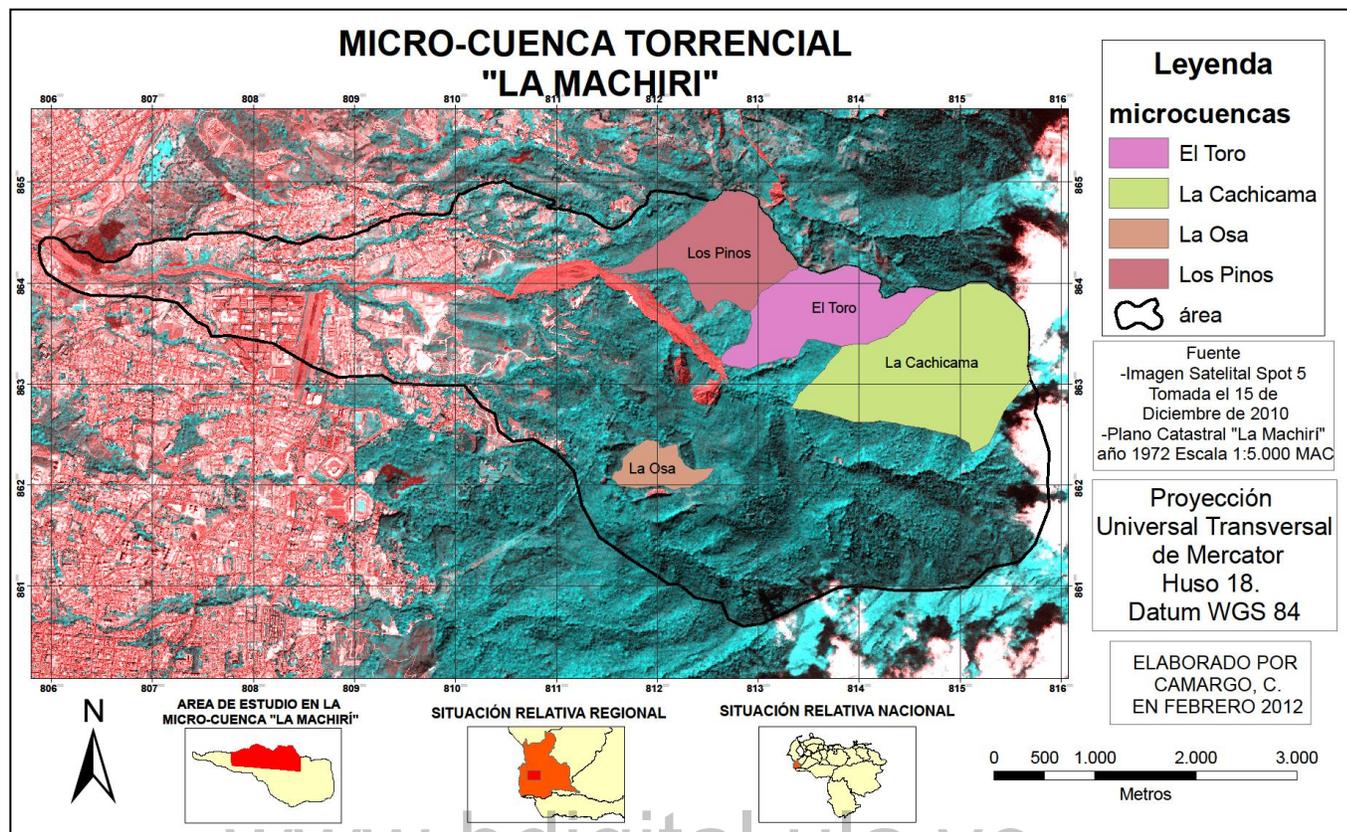


Figura 4. Micro-cuenca torrencial La Machirí.

3.2. Clima

Basado en las observaciones de Hopf (1972) y Uzcátegui (1975), se asume que en la cuenca la precipitación media anual puede ser superior a los 1.300 mm, distribuida con mayor intensidad entre los meses de abril a noviembre, resultado de la extrapolación de los datos suministrados por las estaciones cercanas a la cuenca.

Se infiere que la configuración orográfica, hace aumentar la precipitación a medida que se asciende en altitud en la cuenca, lo cual queda confirmado por el tipo de vegetación natural que se desarrolla en la zona (Ferrer, 1977).

Según Finol (1972), la temperatura promedio anual oscila entre los 21° C en la parte inferior y 16° C en la parte superior, correspondiendo al piso climático macro-mesotermico, en la clasificación de H. Pittier.

3.3.Geología

Según Hopf (1972), en la zona de estudio afloran rocas pertenecientes a la formación La Quinta y a otras formaciones cretácicas, principalmente imperan rocas pertenecientes a la primera formación mencionada, su color rojo ladrillo a rojo chocolate es muy característico (PDVSA, 2009).

La formación La Quinta corresponde a sedimentos depositados al final del paleozoico sobre los antiguos *Preandes* que se hallaban plegados, deformados y erosionados (Ferrer, 1977). Una extensa narración de la historia geológica se puede encontrar en Corpoandes (1972a), Ferrer (1977) o en PDVSA (2009).

La Quinta presenta una naturaleza plástica dado a la presencia de un mayor porcentaje de lutitas y limolitas en su inventario litológico, aunque también pueden presentarse rocas de tipo arenisca. Explica Hopf (1972) que: sus sedimentos varían no solo en cuanto a la naturaleza de las rocas, sino también en cuanto a su grado de meteorización y resistencia a los procesos erosivos; Tienen en conjunto un alto porcentaje de arcilla, son muy friables en seco y blandas al humedecerse, pudiéndose fracturar al menor esfuerzo.

3.4.Geomorfología

Para entender la geomorfología existente en el área de estudio u en cualquier otro lugar, implica ser consciente que “conocer las causas es explicar las geoformas, pues la geomorfología tiene que dar cuenta de la génesis del relieve y

tipificar sus geoformas: explicar fuerzas y procesos y clasificar resultados” Escobar (2003). Por ello, comprender la interrelación que existe entre la hidrosfera y la atmósfera con la superficie terrestre, y haciendo intervenir la variable humana en casos donde se comprobase tajantemente su presencia, significa entender las manifestaciones dadas sobre el espacio.

En la micro-cuenca torrencial La Machirí la dinámica geomorfológica ha constituido una fisiografía no muy diferente a otras en los andes venezolanos, dos realidades muy relacionadas entre sí: el sistema de vertientes y el sistema aluvial (Ferrer, 1977).

La dinámica acontecida en las vertientes dentro de La Machirí ha señalado un proceso donde la geología, aunado al alto grado de pendiente y las prácticas agropecuarias ha ocasionado mecanismos de erosión que ha configurado con el pasar de los años cárcavas espectaculares (Vivas, 1994) o farallones en zonas de grandes derrumbes (PDVSA, 2009) y otros procesos propios activados por la erosión hídrica.

En cuanto a la dinámica aluvial ha estado presente un rellenamiento torrencial del fondo de valle (Ferrer, 1977), donde las pendientes son mucho más bajas, sintiéndose los efectos de la deposición de las pérdidas de material ocurridas en las laderas, no solo en el cono de deyección inmediato sino también a una considerable distancia del punto de cierre de la micro-cuenca, en las propias aguas del río Tórbes y sus zonas aledañas.

Ambos procesos, por estar íntimamente relacionados y generados por la participación de la erosión hídrica, serán tratados con una mayor profundidad y subdividida en sus diferentes tipos, en el capítulo siguiente.

3.5.Suelos

Los suelos de la zona de estudio se originaron a partir de la alteración de las rocas pertenecientes a la formación La Quinta, principalmente de limolitas que le da al suelo una coloración marrón rojiza (2.5 YR 4/4) (Ferrer, 1977).

Según Hopf (1972), en algunas quebradas los suelos pueden variar entre 2 y los 6 metros de profundidad y otros se encuentran directamente sobre la roca. Sin embargo la profundidad para el resto de la cuenca puede ser variable, en el caso de las laderas suelen ser pocos profundos (González, 1982) y en zonas planas de mayor espesor. Así lo demuestran los estudios realizados por los Ingenieros Ramírez y Bastidas (Montoya, 1976), quienes en estudios sobre tres perfiles obtuvieron una profundidad de aproximadamente 2 m, en estos se encontraron las siguientes características:

Horizonte superficial: (0 - 20 cm)

Textura es arcillosa a franco, color rojizo, estructura blocosa sub-angular y bajo contenido de materia orgánica. Suelos ácidos con un pH 5.

Horizonte intermedio: (20 - 74 cm)

Textura arcillosa a franco.

Tercer horizonte: (74 - 198 cm)

Textura arcillosa a franco.

En términos generales los suelos corresponden a la fracción textural Franco arcilloso, de pH ácido, que a pesar de poseer poca materia orgánica constituyen suelos buenos para el desarrollo de algunos rubros agrícolas. Opinión destacada por

Vivas (1992) para los suelos originados a partir de la formación La Quinta, que cuentan como principal limitante y debilidad, su alta susceptibilidad a la erosión hídrica.

3.6. Vegetación

Con base en los datos de precipitación, temperatura y altitud fijados para la cuenca, se puede determinar en el sistema de clasificación de Henry Pittier a la vegetación de tipo Higrofítico, representado en *bosque pluvial montano* y *bosque pluvial nublado* (Finol, 1972). Para el sistema de clasificación climático desarrollado por Holdridge, la vegetación correspondiente en dicho clima es *Bosque Húmedo Premontano* para la faja altitudinal de las pequeñas hondonadas o vallecitos y *Bosque Húmedo Montano Bajo* en la faja altitudinal de las zonas escarpadas hasta las divisorias de aguas (Hopf, 1972). La distribución y los tipos de vegetación forestal, dependen de la variación de las condiciones edáficas, topográficas y climáticas existentes (TRAGSA, 1994).

La vegetación arbórea es abundante, entre las cuales se puede mencionar el Mijao (*Anacardium excelsum*), Bucare (*Erythrina sp*), Guamo (*Inga sp*), Guácimo (*Guazuma ulmifolia*), Cariaquito (*Lantana sp*), Guayabita (*Psidium guinense*) y el vistoso Yagrumo u Orumo (*Cecropia obtusifolia*); una lista más detallada de especies presentes en el área de estudio se puede encontrar en la publicación desarrollada por el Ministerio de Agricultura y Cría (MAC, 1974).

3.7. Hidrografía

La micro-cuenca “La Machiri”, está insertada en la sección media de la cuenca del Río Tórbes, situada en su vertiente izquierda. Definida como de carácter torrencial, se caracteriza por pendientes irregulares; deforestación de sus vertientes;

avenidas súbitas y violentas y carga de sedimentos que se hacen presentes en función de las escorrentías generadas por la cuenca. Hidráulicamente, es sinónimo de flujos rápidos o supracríticos, que la diferencian muy bien de los denominados flujos lentos, infracríticos o fluviales (TRAGSA, 1994). Es perentorio aclarar que, este tipo de flujos que se suscitan en este tipo de cuencas, están asociados a cuencas indebidamente intervenidas, especialmente por la deforestación (INGEOMINAS, 2002).

3.8. Materiales Requeridos

3.8.1. Fotografías aéreas

Fotografías aéreas pancromáticas con cobertura sobre el área de la micro-cuenca torrencial “La Machirí” tomadas por Cartografía Nacional, con las características siguientes:

- Misión A-34, año 1952, escala 1:40.000, fotos: 803-804-805
- Misión 010295, año 1971, escala 1:25.000, fotos: 031-033-035-030-028-026-011-009-007
- Misión 0102121, año 1976, escala 1:25.000, fotos: 081-082-083
- Misión 0102138, año 1983, escala 1:50.000, fotos: 130-131-132

3.8.2. Cartas Cartográficas

- Análisis de la Cuenca Quebrada La Machirí, Año 1970, Escala aprox. 1:12.000, elaborado por Corporación de los Andes.
- Plano Catastral “La Machirí”, Año 1972, Escala 1:5.000, elaborado por el Ministerio De Agricultura y Cría.

- Aspectos geomorfológicos sub-cuenca “La Machirí”, año 1975, escala 1:15.000 elaborado por División de Información e Investigación del Ambiente Zona 6.
- Plano Aerofotogramétrico San Cristóbal y Pueblos Cercanos, año 1982, escala 1:5.000, elaborado por el Ministerio Del Desarrollo Urbano.
- Mapa topográfico (hoja 5739 II NO) a escala 1:25000, con actualización instrumental basado en fotografías aéreas de 1983, elaborado por la dirección de Cartografía Nacional.
- Mapa topográfico LA MACHIRI, año 1971, escala 1:2.500, elaborado por TRAGNAR C.A. (HOJAS D-6, D-7, E-6, E-7) para el Ministerio De Agricultura y Cría, dirección de Recursos Naturales Renovables.

3.8.3. Imagen Satelital SPOT 5

Imagen multiespectral, nivel de pre-procesamiento 1A, que consiste en la corrección de los errores radiométricos originados en la diferencia de sensibilidad entre los detectores elementales del instrumento de captura de imagen (igualación radiométrica), también permite aumentar considerablemente la localización de las imágenes que pasa entonces a 30 m (SPOT Image, 2005B).

Tomada el 15 de diciembre de 2010, de referencia K= 649 y J=334. Imagen en medio digital que cuenta con cuatro bandas (Tabla 3). Cada banda posee 7309 filas y 7194 columnas. El centro de esta imagen es 7° 41' 51" de latitud Norte y 72° 16' 11" de longitud Oeste.

Tabla 3. Resolución espectral de imagen SPOT 5 (SPOT IMAGE, 2005a).

Bandas	Sensibilidad Espectral
B1	verde: 0,50-0,59 μm
B2	rojo: 0,61-0,68 μm
B3	infrarrojo cercano: 0,78-0,89 μm
PANCROMATICA	0,48-0,71 μm

4. Adquisición de Fotografías Aéreas e Imagen Satelital SPOT 5

Las fotografías aéreas seleccionadas fueron obtenidas en el Instituto Geográfico Venezolano Simón Bolívar (IGVSB), donde la disposición de las mismas estuvo restringida al período 1970-1983, excluyéndose los años anteriores, dado a que se encuentran en estado deterioro causado por un proceso que el personal de dicha institución denomina “avinagramiento”, el cual consiste en que “los negativos de las películas de las misiones aerofotográficas se hacen menos resistentes a la manipulación por parte de los técnicos y se convierten en un riesgo para la salud de los mismos al desprender parte de los químicos que los componen dado al paso del tiempo” (Torres, D. 2010, abril) [Entrevista con Deyanira Torres, Gerente de ventas del IGVSB]. Estas fotografías constituyen las de mayor precisión dado a que fueron escaneadas a una resolución de 14 micrones que representan en la escala de las fotos 0,34 m (misiones 010295-0102121-0102138).

Se obtuvo en el Ministerio Del Poder Popular Para El Ambiente (MPPA) del Estado Táchira, fotografías aéreas de la misión A-34 del año 1952, éstas fueron escaneadas con un escáner corriente, lo que le atribuye una resolución de escaneo de 100 micrones aproximadamente (Mendoza, C. 2010, Enero) [Entrevista con Carlos Leonardo Mendoza, Coordinador del laboratorio de fotogrametría Universidad Nacional de Colombia en Bogotá] grabado en audio y (Limongi, B. 2010, Abril). [Entrevista con Blas Limongi, fotogrametrista de la Coordinación

Técnica de Vuelos del IGVS B en Caracas] grabado en audio; esta resolución de escaneo representó 1 m para la misión A-34.

La imagen SPOT 5, fue cedida por el Dr. Alexander Parra Uzcátegui, profesor adscrito al Instituto de Fotogrametría de la Universidad de Los Andes-Mérida.

5. Corrección de imágenes

En primera instancia se determinó la presencia de defectos en las imágenes satelitales y fotografías aéreas que afecten el estudio dentro del área, como errores comunes denominados “torres” y “vacíos” (Roa, J. y Kamp, U. 2008), los cuales consisten en píxeles sin información alguna dentro de las imágenes satelitales o las fotografías aéreas.

Seguidamente se procedió con las correcciones geométricas, a partir de **puntos de control** que fueron distinguibles tanto en las fotografías aéreas e imágenes satelitales, como en los mapas básicos, tratando en lo posible que estos tuviesen una distribución regular en el área de estudio. Dichas correcciones fueron evaluadas por medio del concepto del Error Medio Cuadrático (EMC), el cual consiste en el error que podría cometerse al momento de digitalizar una línea (0,25 mm de ancho, resultado del trazo de una línea de un lápiz corriente) en la elaboración de un mapa (tomando en cuenta la escala), confrontada con el informe de errores que genera el SIG al momento de la georeferenciación (Laboratorio de Fotogrametría y Sensores Remotos, 2007).

6. Mejoramiento de Imagen Satelital

En el caso de la imagen Spot-5, se usó la técnica de **fusión de imágenes: Pan Sharpened ESRI**, entre la banda pancromática (2,5 m de tamaño de pixel) y la

multiespectral (10 m de tamaño de pixel), a fin de mejorar la habilidad de discriminar información de detalles de un sistema sensor de los objetos presentes (resolución espacial) (Chuvienco, 2008), este método de fusión utiliza un promedio ponderado para crear un valor de ajuste, el cual es usado en el cálculo de los valores de salida del nuevo raster (ESRI, 2008).

Basado en la información multi-espectral que ofrece el sensor, se realizó una combinación entre las bandas para obtener una composición de color y con ello facilitar la delimitación visual de algunas cubiertas. Para ello, en cada canal (rojo, verde y azul) se asignó una banda distinta de la imagen, generando la combinación 2-1-1, selección que se hizo tomando en cuenta que la imagen SPOT 5 no cuenta con la banda espectral azul del rango espectral de la luz visible (0,45 - 0,49 μm), con lo cual podría haberse generado una combinación similar a la que perciben nuestros ojos, que se denomina “color natural” (Chuvienco, 2008).

7. Georeferenciación de mapas

Se realizó mediante el uso de los SIG, determinando para ello la búsqueda del menor Error Medio Cuadrático Tolerable (EMCT) para los diversos mapas a usar, este valor se calculó mediante el criterio planteado por el Laboratorio de Fotogrametría y Sensores Remotos (2007), en donde EMCT es igual a 0,25 mm (equivalente a 1-1,5 pixel) multiplicado por la Escala del Mapa (ME). La Georeferenciación de los mapas contó con la escogencia de los puntos de intersección de la grilla correspondiente al sistema de coordenadas UTM.

8. Georeferenciación correcta de fotografías aéreas basado en ortofoto.

Hacia la corrección de las distorsiones propias de una fotografía aérea: desplazamiento debido al relieve, inclinación de la cámara, curvatura de la tierra,

errores sistemáticos asociados con la cámara y la inestabilidad de la película (Hernández, 2008a), se aplicó una serie de transformaciones matemáticas de distinto orden: 1er orden o lineal, 2do orden o Curvilínea y 3er orden o cúbicas, las cuales hacen necesario un mínimo de tres enlaces entre puntos de control, para la obtención de los errores residuales en la distribución de los puntos. Se basó en la premisa que “un orden mayor en la transformación permitirá corregir mayores distorsiones requiriendo para ello un número mayor de puntos de control” (Moreno, 2008).

Las distorsiones son corregidas dentro de un SIG, solo si se conocen las coordenadas de los puntos de control, a esto se le conoce como Transformación curvilínea, entre los que se haya: transformación con polinomios de primer orden donde se requiere mínimo cuatro puntos de control origen-destino; transformación de segundo orden, con un mínimo de seis y transformación de tercer orden con un número no menor a diez (Moreno, 2008).

También existe la transformación Spline, el cual es un método que optimiza la precisión a escala local, pero no global. Spline transforma los puntos de control de origen a los puntos de control de destino. Esta transformación es útil cuando los puntos de control son importantes y se requiere que sean registrados con precisión. La adición de más puntos de control logra aumentar la precisión general, este método requiere mínimo de diez puntos de control. Una descripción detallada de los métodos curvilíneos y cúbicos de georeferenciación se halla en Moreno (2008) y ESRI (2008). Dependiendo de la cantidad de puntos de control origen-destino, se determinó el método en cada una de las fotografías.

9. Metodologías de evaluación de procesos de erosión

9.1. Evaluación de la erosión utilizando diversos MDE

Sólo se aplicó al área de las cárcavas “Los Pinos” y “El Toro”, por ser estas la que manifestaron de modo evidente los procesos de erosión, así como también otras áreas donde ocurrieron procesos y que fueron cubiertas por el proceso fotogramétrico empleado en este estudio a partir del cumplimiento de los requerimientos de los parámetros ameritados por el mismo (la cárcava “La Cachicama” no pudo ser cubierta por la metodología de evaluación de la erosión utilizando diversos DEM por la falta de cubrimiento entre las fotografías aéreas existentes que permitiera generar restitución de curvas de nivel para dicha área).

La aplicación de esta metodología fue desarrollada en una escala comprendida entre 1:2.500 a 1:5.000, según la calidad de la información y la posibilidad que ofreció esta de tratamiento. (No se trabajó con una escala inferior a los 2.500, puesto que se usó como escala de referencia el trabajo realizado por TRAGNAR en 1971).

El procedimiento aplicado en el área de estudio incluyó los siguientes pasos, parcialmente sugerido por Martínez-Casasnovas (2004) y complementado con Hernández (2008a) (Figura 5).

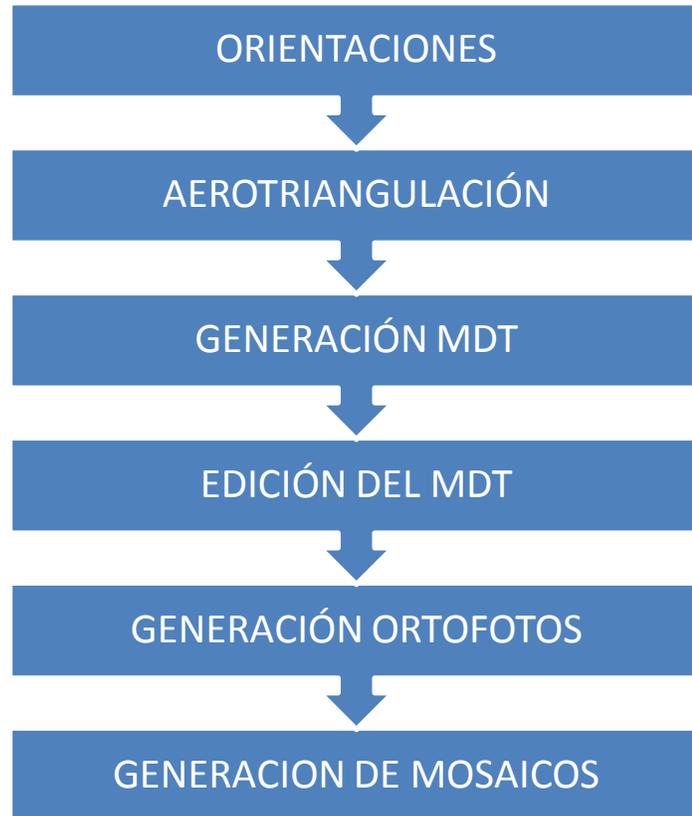


Figura 5. Proceso fotogramétrico (tomado de Hernández, 2008a).

- **Orientaciones** que implicó la georeferenciación correcta de las fotografías aéreas (mediante el software fotogramétrico ERDAS módulo LPS 9.1 desarrollado por Leica Geosystems), basado sobre puntos de control (determinación de sus tres coordenadas) para la orientación interna y externa por par estéreo, estos se localizaron en sitios precisos de las fotografías, siendo detalles visibles en éstas y apreciables en el terreno al momento de su localización (inclusión de la solución del problema al error medio cuadrático) (Martínez-Casasnovas, 2004).
- **Aerotriangulación** por medio del método de haces de rayos, que permitió determinar las coordenadas terrestres midiendo los ángulos y/o distancias en las fotografías, con poca información de campo, aprovechando de este modo,

las relaciones geométricas entre fotografías en una solución espacial que usa los principios perspectivas (Hernández, 2008a), proceso requerido para la generación de las curvas de nivel y posterior edición de las mismas, necesario para la construcción del MDT (**Generación y Edición del MDT**).

- **Suavizado de las curvas de nivel** (aplicación de la opción Smooth elevations del software fotogramétrico ERDAS módulo LPS 9.1).
- **Generación de las curvas de nivel.**
- **Generación de Red de Triángulos Irregulares (TIN)**, utilizando un SIG, para la posterior interpolación de los centros de altitud de cada celda en la red de celdas (**conversión de TIN a raster**) (Martínez-Casasnovas, 2004),
- **Homogenización del tamaño de celda** a 2 m. para todos los raster.
- Aplicación del módulo de **cálculo de volumen** (sólo aplicado para el área en común de los modelos obtenidos y en los sectores donde fue evidente los cambios, tales como el área correspondiente a la cárcava “Los Pinos” y otros sectores considerados convenientes), que constituye una de las tareas más sencillas y útiles a realizar de un MDT; la información de elevaciones contenida en el MDT puede servir para calcular volúmenes de desmonte, terraplén y volúmenes globales para toda una capa (Olaya, 2006), a su vez también pueden hacerse estimaciones entre una cota en particular y otra o incluso calcular el agua almacenada en un embalse (ESRI, 2008), utilizando para ello los diversos módulos sobre estimación de **Volumen** con lo que cuentan los SIG.
- Seleccionando el MDT como única capa de entrada y una altitud base, se evaluó el volumen total de las áreas seleccionadas, en función de que contabilizaran los volúmenes por encima de la altitud base (que corresponde

para el punto de la cota mínima señalada en las cartas elaboradas por TRAGNAR), el resultado fue un valor de volumen, expresado en las mismas unidades que el tamaño de celda (por supuesto, al cubo), expresado en un pequeño cuadro de diálogo.

- Realización de **sustracción entre los diversos resultados de los DEMs** para hallar la diferencia de altitud de las áreas seleccionadas.
- Entre las consideraciones tomadas, las pertinentes a la vegetación en las paredes laterales de las cárcavas así como las sombras en las fotografías aéreas, fueron tratadas de modo manual basado en la interpretación visual durante el proceso de edición del MDT pues pudieron interferir con el proceso de restitución automatizado que desarrolla el proceso fotogramétrico, lográndose con ello evitar representaciones del terreno y estimaciones de volúmenes erróneas.
- **Generación de Ortofotos**, las cuales son fotografías que muestran los elementos que aparecen en ella en su verdadera posición ortogonal (transformación de una proyección central a una ortogonal) (Hernández, 2008a), constituyendo los elementos para comparar y realizar las diversas mediciones propuestas (es la corrección de los errores producidos por las deformaciones que genera el relieve, la inclinación de la cámara y la curvatura de la tierra, entre otros).
- **Generación de Mosaico**, utilizando un SIG, que consiste en la unión de las ortofotos obtenidas superpuestas para formar una imagen uniforme (Hernández, 2008a).

9.2. Evaluación del estado de los procesos de erosión

Los diversos estados en que se encuentran los procesos de erosión se determinó en función del criterio de Moreiras et al. (2008), quienes definen tres tipos de estado: **procesos activos**, aquellos que aún están en movimiento, incluyendo la primera rotura y sus reactivaciones; **procesos reactivados**, aquellos deslizamientos con nuevos eventos luego de ser inactivos y que generalmente se mueven sobre una superficie de rotura pre-existente y **procesos inactivos**, los que no presentan actividad. (En el caso de la elaboración de la cartografía base para 2010, se hizo intervenir aunado a la interpretación visual tanto en pantalla como en campo, el uso del GPS para la constatación de los fenómenos presentados, mediante la correcta localización en campo de los fenómenos observados).

La designación de los tipos de estado de los procesos de erosión, en las fotografías aéreas como en las imágenes satelitales se desarrolló a través de la identificación de las características de las imágenes presentadas, específicamente sus indicadores (tono, textura, patrón, forma, tamaño, posición, relación con objetos circundantes, topografía y sombra) y elementos de interpretación (elementos de carácter estático o dinámico), una explicación exhaustiva de los indicadores y elementos señalados se puede encontrar en Larsson y Strömquist (1995).

El método aplicado se fundamentó completamente en la interpretación visual, pues como asegura Larsson y Strömquist (1995) en sus conclusiones sobre casos de estudio aplicados por la FAO a nivel mundial y proyectos en países africanos, resulta ser la solución más práctica en la interpretación de imágenes de satélite Landsat TM y SPOT, esta última empleada en el presente estudio, para determinar

el estado de los procesos de erosión en el año 2010; la interpretación visual también se aplicó a las fotografías aéreas.

La interpretación visual desarrollada buscó identificar las “áreas homogéneas” como base para la regionalización de los datos (Larsson y Strömquist, 1995) y que consecuentemente fue usado en la determinación de las clases para el monitoreo de los cambios relacionados a los procesos de erosión en la cuenca para el periodo 1952-2010.

9.3. Sistema de clasificación de la erosión en África Meridional

Los tipos de erosión fueron clasificados mediante la aplicación del sistema desarrollado por Strömsquist y Larsson (1995) (empleado en los países de África Meridional), quienes a su vez desarrollaron un sistema para la clasificación de la erosión del suelo por fotointerpretación, que fue modificado más tarde para usarlo con imágenes satelitales (Tabla 4 y 5), este método busca clasificar los tipos de erosión existente.

Tabla 4. Clasificación de la erosión laminar de acuerdo al sistema desarrollado por SARCCUS en 1981 (Larsson y Strömquist, 1995).

Tipo de erosión	Grado de erosión	Descripción
Erosión Laminar: Remoción uniforme del suelo superficial	L1:No aparente	Sin signos visibles de erosión en las fotografías aéreas o imágenes satélites: El nivel de manejo parece ser alto.
	L2: Leve	Áreas de tono claro se observan en las fotos aéreas. La erosión deduce por la pobre cobertura vegetal, depósitos de sedimentos y la condición del pie de las plantas (observado en el campo).
	L3:Moderada	Áreas erodadas evidentes en las fotos aéreas- Cubierta vegetal muy pobre y extensos depósitos de sedimentos. Está asociada con pequeños surcos (observados en el terreno).
	L4:Severa	Erosión laminar de tal severidad que siempre está asociada con surcos y cárcavas. La mayor parte o todo el horizonte A del suelo ha sido removido.
	L5:Muy Severa	Como la clase L4. La erosión ocupa la mayor parte del área de la unidad y está asociada con la clase C5 de erosión en cárcavas.

Nota: las clases moderada (3) a muy severa (5) a menudo incluyen una combinación de dos o más tipo de erosión hídrica.

Tabla 5. Clasificación de la erosión en cárcavas de acuerdo al sistema desarrollado por SARCCUS en 1981(Larsson y Strömquist, 1995).

Tipo de erosión	Grado de erosión	Descripción
Erosión en cárcavas: Remoción del suelo en grandes canales o cárcavas por escorrentía concentrada proveniente de grandes áreas de captación.	L1:No aparente	Igual que para la erosión laminar.
	L2: Leve	Claramente observable en fotografías aéreas, usualmente hasta un metro de profundidad. No puede ser cruzada por maquinaria agrícola.
	L3:Moderada	Patrón intrincado de cárcavas profundas (principalmente de 1 a 3 m de profundidad) con exposición del perfil completo del suelo en algunos lugares. Muchas “islas” de remanentes de tope del suelo.
	L4:Severa	Paisaje disectado y truncado por grandes cárcavas (de 3 a 5 m de profundidad).25%- 50% del área es improductiva.
	L5:Muy Severa	Cárcavas grandes y profundas (a menudo > 5 m) con denudación total en más del 50% del área.

Nota: las clases moderada (3) a muy severa (5) a menudo incluyen una combinación de dos o más tipo de erosión hídrica.

9.4. Elaboración de MDT a partir de proceso fotogramétrico digital sobre misión aerofotográfica 0102121, año 1976, escala 1:25.000 (fotos: 081-082-083)

Siguiendo el proceso fotogramétrico y cumpliendo con los requerimientos (determinación de la marca y parámetros de la cámara, proyección, datum, altitud de vuelo, distancia focal y marcas fiduciales) expresados por Hernández (2008 y 2008a) (Figura 7), se conformó el bloque de fotografías comprendido por las fotografías 081-082-083, a escala 1:25.000 (Figura 6), las cuales cuentan con un criterio de solape oscilante al 60% entre las mismas, necesaria para la obtención de la visión estereoscópica artificial de anáglifo (Hernández, 2008a), se procedió a la elaboración de la Aerotriangulación, generación del MDT y su posterior edición para la generación de las curvas de nivel en intervalos de 10 m.; el suavizado de las curvas se realizó con el software fotogramétrico ERDAS módulo LPS 9.1 (Figura 8), aunado a esto se creó la ortofoto y el mosaico correspondiente.

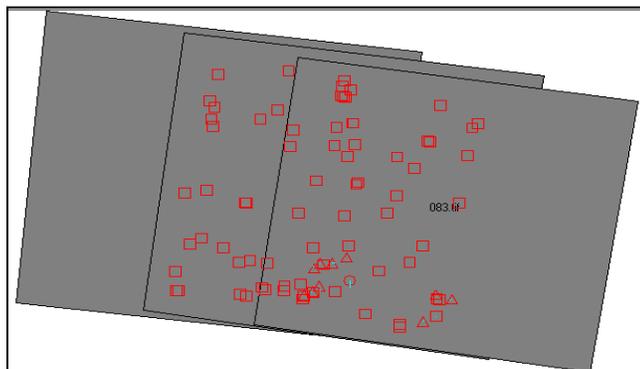


Figura 6. Esquema que muestra la conformación del bloque basado en las fotografías aéreas de la misión 0102121, a su vez se representa con triángulos los puntos de control y con cuadrados los puntos de amarre en el software fotogramétrico.

Es perentorio aclarar que las marcas fiduciales no pudieron ser extraídas de los valores con que cuenta el certificado de calibración de la cámara, los mismos fueron hallados propiamente en las fotos por medio de la aplicación de un SIG (Figura 6).

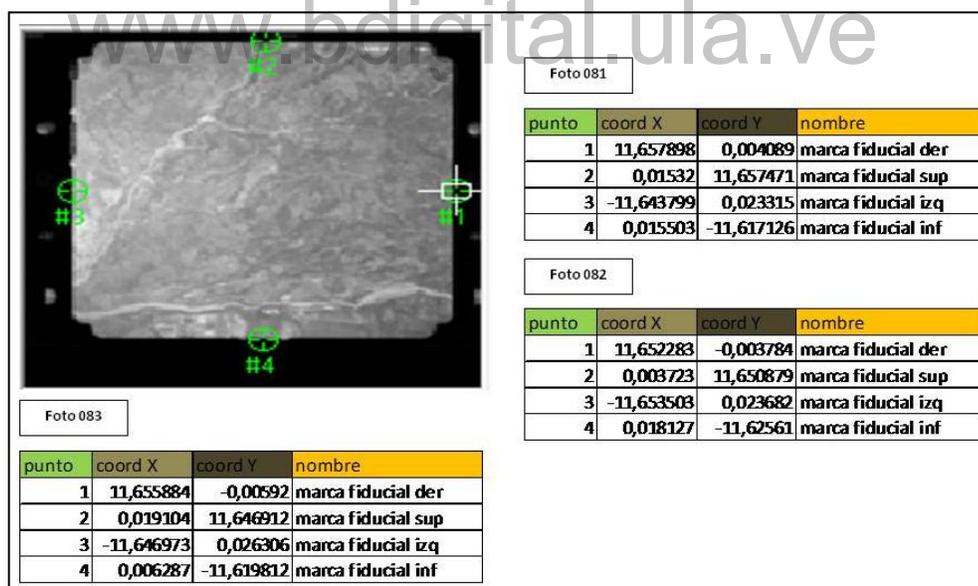


Figura 7. Marcas fiduciales extraídas con SIG sobre fotografías aéreas de la misión 0102121.

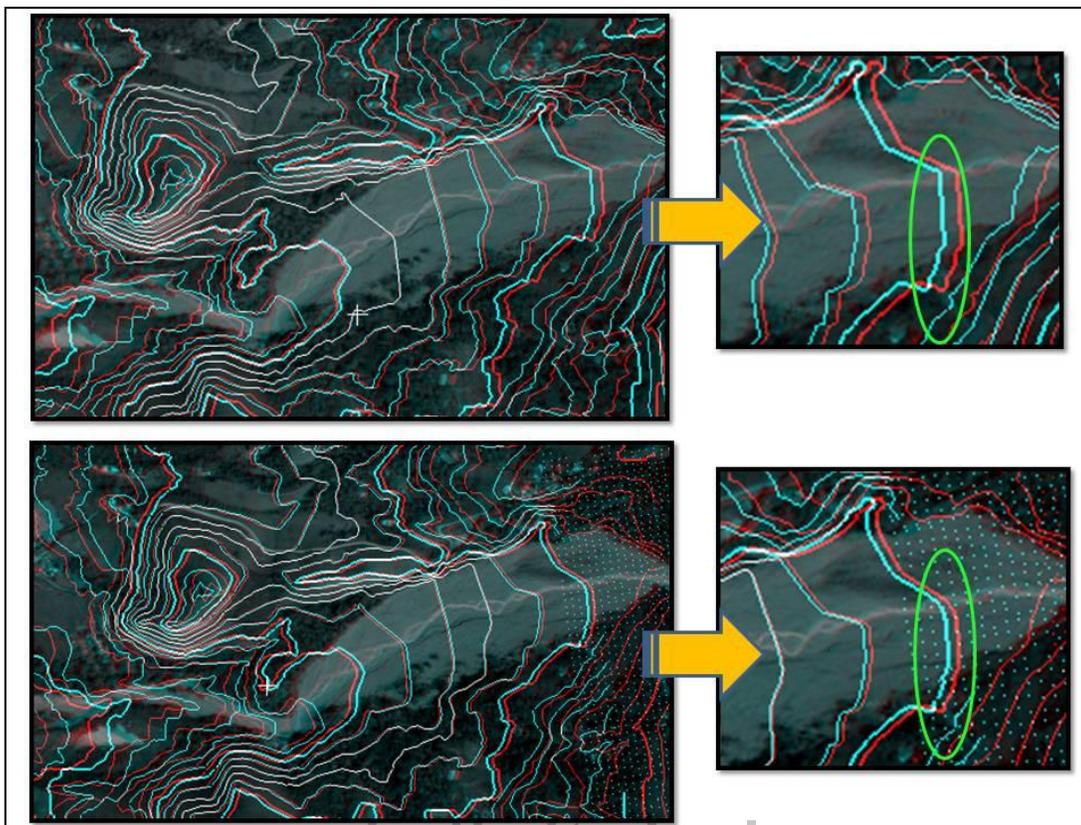


Figura 8. Generación y edición del MDE. En la imagen superior se muestra el resultado del modelo generado y en la inferior el suavizado de las curvas obtenidas (visión estereoscópica por medio de anáglifo).

Finalizado el proceso de edición del MDT se generó el archivo ASCII con los valores X, Y y Z, el cual permitió obtener el formato “shape” de alta utilidad en los SIG, a partir de él, se creó una imagen constituida por una red de triángulos irregulares (TIN) necesaria para la posterior creación de una vista 3D de la misma y del DEM requerido (Figura 9).

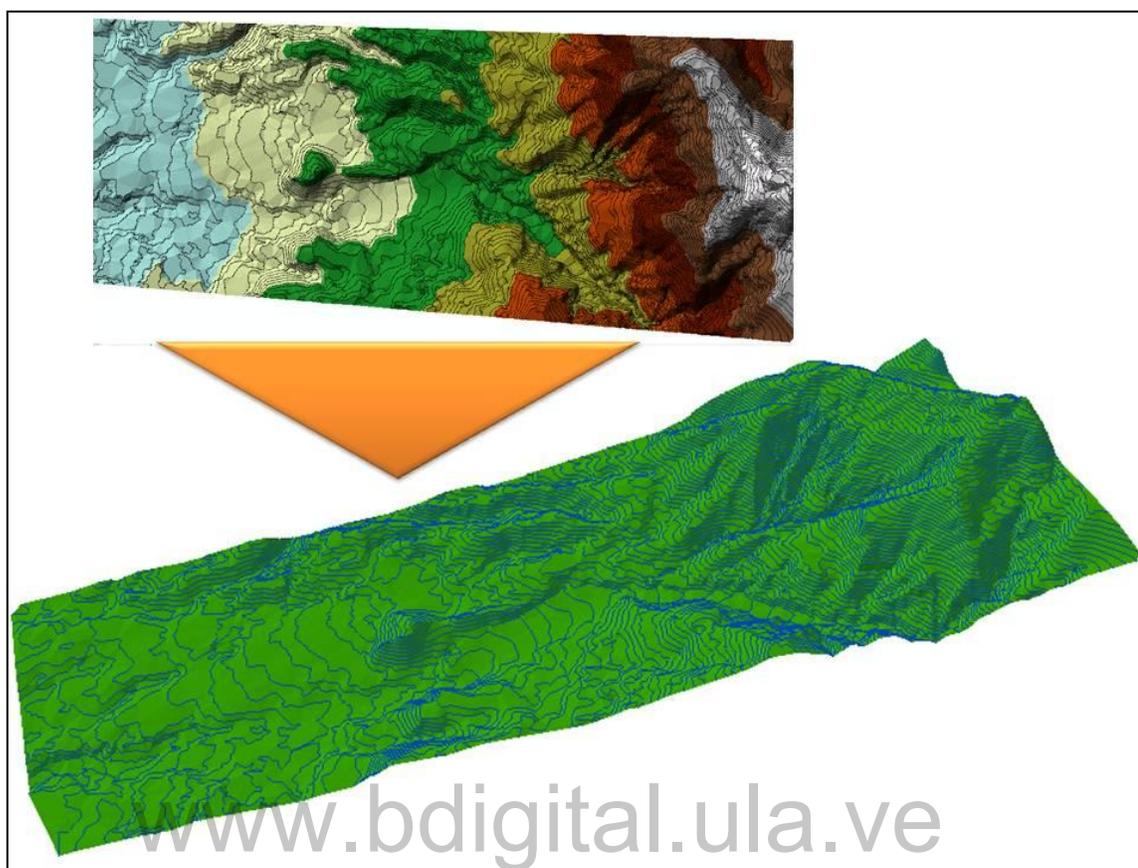


Figura 9. Creación del formato “shape” usado con el Sistema de Información Geográfica (SIG), mediante la elaboración de una máscara (polígono) y el geoproceto “intersección” se extrajo la sección correspondiente al área de estudio, con el cual se generó El TIN (Red de triángulos irregulares) y la vista 3D del mismo.

El proceso fotogramétrico también permitió la generación de la ortofoto donde definió como tamaño de pixel de salida: 0,34 m. (resolución de pixel heredada de las fotografías aéreas escaneadas a una resolución de 14 micrones), definiéndose como técnica de remuestreo el método de interpolación bilineal (asignación de valor digital de los pixeles de la nueva imagen producida).

9.5. Georeferenciación y corrección de distorsiones de fotografías aéreas a partir de una ortofoto

En el caso de la misión A-34, se usó la fotografía número 804, la cual presentaba mejor resolución espacial, necesaria para la determinación de objetos (elementos introducidos de forma antrópica en el espacio) y la posterior ortorectificación basada en puntos visibles y coincidentes entre esta fotografía y la ortofoto generada por medio del proceso fotogramétrico digital sobre las fotografías de la misión 0102121 (la ortofoto fue usada también para georeferenciar las fotografías restantes), con ello se determinó una serie de puntos de control entre ambas imágenes que permitió establecer una relación. La georeferenciación y corrección se logró por medio de 19 puntos distinguibles entre ambas imágenes, sólo localizados en la zona concreta del área de estudio, transformados por el método curvilíneo Spline (Tabla 6).

Tabla 6. Puntos de control utilizados en la georeferenciación de la fotografía área 804 (misión A-34) extraídos a partir de ortofoto generada desde las fotografías aéreas de misión 0102121, (Sistema de Referencia WGS 1984 UTM Zona 18N).

Punto	Longitud E	Latitud N
1	810481,475	865010,060
2	810977,435	864809,347
3	811509,524	864541,514
4	810573,826	864129,033
5	808236,967	863957,331
6	808612,997	864205,463
7	809917,406	864442,028
8	809,083,698	864178,630
9	809925,588	864691,123
10	811631,536	863848,500
11	812878,741	864896,186
12	813425,386	864174,969
13	812906,698	863534,217
14	813015,004	863931,340
15	811495,070	863568,843
16	809712,709	863401,442
17	809396,119	863457,678
18	810531,021	863585,077
19	811665,693	864141,479

La fotografía aérea 132 perteneciente a la misión 0102138, fue primero procesada mediante un mejoramiento de contraste, para obtener un mejor capacidad de discriminación de los objetos, por medio de la asignación de tonos más claros a los pixeles de la imagen, lo que significó repartir y asignar exhaustivamente el color de la paleta pancromática conveniente y satisfactoria a los valores de los pixeles en la imagen, para ello se determinó la desviación estándar como método aplicado, que se tradujo en asignar la gama de grises a un intervalo central de la distribución univariada de los valores con una amplitud de 1,5 desviaciones típicas (una mayor explicación de este proceso se puede hallar en Chuvieco, 2002 y ESRI, 2008). La Georeferenciación y corrección se logró a través de 28 puntos visibles, aplicándose sobre ellos el método Spline (Tabla 7).

Tabla 7. Puntos de control utilizados en la georeferenciación de la fotografía área 132 (misión 0102138) extraídos a partir de ortofoto generada desde las fotografías aéreas de misión 0102121, (Sistema de Referencia WGS 1984 UTM Zona 18N).

Punto	Longitud E	Latitud N
1	811179,387	863816,686
2	810889,502	863787,412
3	811401,927	863817,820
4	811789,077	863481,439
5	810970,248	864217,282
6	810840,629	864307,415
7	811221,434	864348,353
8	811399,511	864391,946
9	811797,388	864293,114
10	812664,346	864922,173
11	812989,011	864842,468
12	813022,231	864742,808
13	813430,562	864171,325
14	813524,226	863639,324
15	808640,796	863838,313
16	808365,298	864070,276
17	808196,039	863923,094
18	810348,353	864400,573
19	810223,339	864404,934
20	810141,139	864067,176
21	810046,780	863857,524
22	809711,718	863402,008
23	809544,024	863488,260
24	809490,316	863425,319
25	808266,543	864799,384
26	808944,971	864936,435
27	808786,732	864788,471
28	805988,000	864821,379

CAPITULO IV

10.RESULTADOS

10.1. Georeferenciación de mapas y determinación de puntos de control

10.1.1. Cartas TRANARG C.A. 1971 “LA MACHIRI” (Hojas D-6, D-7, E-6, E-7)

En la georeferenciación de las cartas elaboradas por TRANARG C.A. en el año 1971 (“LA MACHIRI”), se tomó en cuenta que para un modulo escalar 2.500, el EMT debía ser menor a 0,62 m basado en el criterio desarrollado por Laboratorio de Fotogrametría y Sensores Remotos (2007); siendo el valor del EMCT obtenido entre 0,40 m y 0,59 m para cada una de las cartas, se cumplió con este criterio obteniéndose una buena georeferenciación.

Como señala Martínez-Casasnovas (2004) y Hernández (2008), los puntos de control implican el conocimiento de los valores X, Y, Z, de los puntos observables en las fotografía aéreas (estos valores fueron obtenidos de las cartas elaboradas por TRAGNAR C.A. (previamente georeferenciadas) (Figura 10 y Tabla 8).

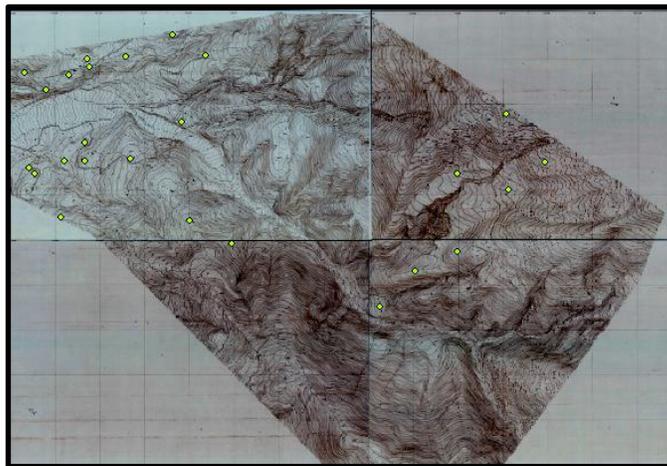


Figura 10. Georeferenciación y Determinación de puntos de control. Cartas 1:2.500.

Tabla 8. Determinación de las coordenadas (X, Y, Z).

ID	NOMBRE	Longitud E	Latitud N	ALTITUD
1	casa esq. Inf der	811177,27	863921,168	1177,5
2	casa esq. sup izq.	811067,057	863820,938	1174
3	casa esq. sup izq.	810902,457	863747,705	1164,46
4	casa esq. inf	811721,014	864038,67	1231,07
5	casa esq. sup izq.	811092,294	864294,742	1202
6	casa ángulo interno	811194,493	864387,462	1216,3
7	casa esq. sup der	811405,482	864396,802	1216,9
8	casa esq. inf izq.	811667,861	864516,275	1270,4
9	Casa lejana (14b)	811762,979	863491,154	1372
10	Casa cerca de cárcava (15b)	811997,842	863363,189	1374,75
11	Techo (17b)	813541,791	863661,784	1669
12	Tanque (18b)	813255,53	863752,696	1614
13	Techo 2 (19b)	813258,542	863321,034	1600
14	Vaquera (20)	813021,964	863207,984	1519
15	casa en cárcavas	812824,775	863016,359	1409,8
16	casa sobre cárcavas	813747,384	863811,682	1764,6
17	casa divisoria	813529,741	864081,77	1822,2
18	casa B	811436,583	863831,271	1256
20	casa C	811049,375	863509,839	1219
21	casa F	810842,41	864306,991	1168,2
22	casa G	811207,302	864342,074	1212,5
23	casa E	810966,628	864214,001	1174,1
24	casa H	811850,204	864403,696	1281,2
26	casa J	810869,483	863780,776	1132
27	casa A	811180,75	863818,433	1204,5

La determinación de los nombres de los puntos de control obedeció a criterio personal, que solo buscó servir de identificador de los puntos mostrados tanto en fotografías aéreas como en las cartas TRANARG C.A., resultando de este modo, un total de 27 puntos correlacionados totalmente entre ambas fuentes de información (Cartas TRANARG C.A. correspondientes a 1971 sobre las fotografías de la misión 0102121 de 1976).

10.2. Evaluación de la erosión utilizando diversos DEMs.

10.2.1. DEM obtenido a partir de digitalización de curvas de nivel elaboradas por TRANARG C.A. Año 1971.

El estudio desarrollado por TRANARG C.A., para la generación de curvas de nivel, se centró solo en las áreas donde los procesos de erosión concentrada (Cárcavas) eran evidentes, sin embargo parte de la corona perteneciente a la “Cárcava de los Pinos” no fue incluida (El proceso de restitución de las curvas de nivel fue aplicado por esta empresa en las fotografías aéreas correspondientes a la misión 010295 llevada a cabo por la misma en febrero de 1971 presentando resultados en mayo del mismo año). La curva de nivel base de menor altitud elaborada fue la 1.130 m y la mayor la 1.960 m.

La digitalización de las curvas de nivel base presentada en las cuatro cartas elaboradas por TRAGNAR C.A. se realizó de forma manual en pantalla (Figura 11).

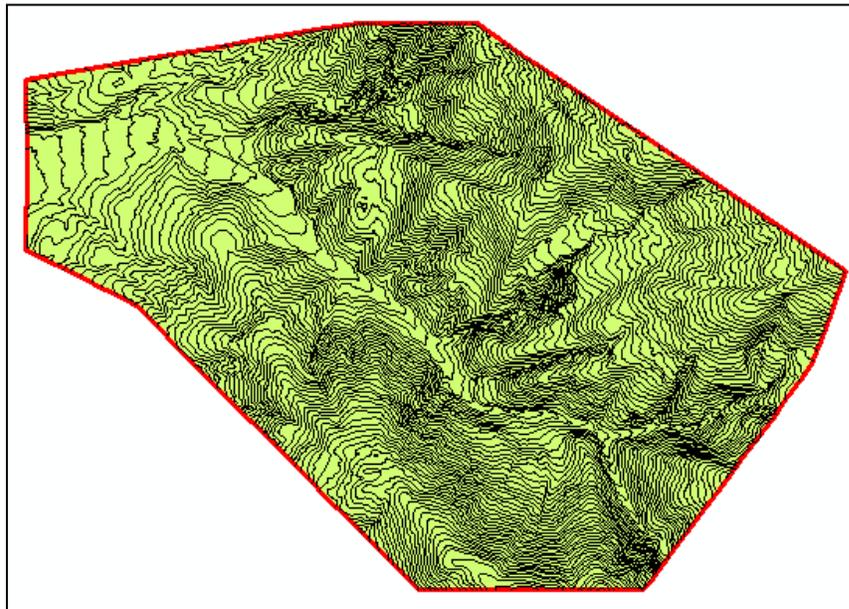


Figura 11. Digitalización de curvas de nivel elaboradas por TRAGNAR C.A. 1971.

A partir del TIN, creado desde la capa vectorial de curvas de nivel y mediante la conversión de este a raster de elevación por un SIG, se produjo el DEM del área de estudio con un tamaño de celda de 2 m. (Figura 12), al que a su vez se le realizó un remuestreo por el método bilinear cúbico para su salida en el “Display”.

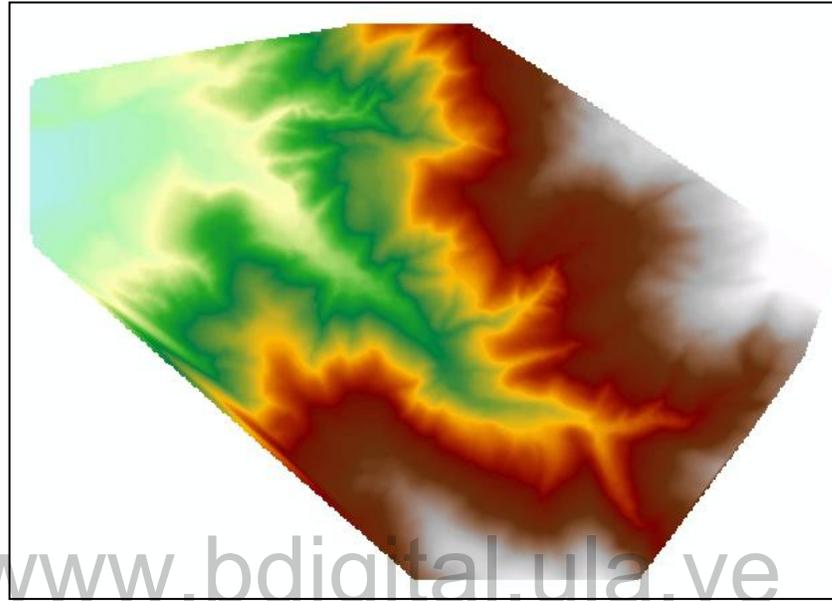


Figura 12. Creación de Raster de Elevación con tamaño de pixel de 2 m. para el modelo elaborado por TRAGNAR C.A. (1971).

10.2.2. DEM obtenido a partir de proceso fotogramétrico digital sobre misión aerofotográfica 0102121, año 1976, escala 1:25.000 (fotos: 081-082-083)

Obtenido el TIN y creado desde la capa vectorial de curvas de nivel y mediante la conversión de este a raster de elevación por un SIG, se produjo el raster de elevación del área de estudio con un tamaño de celda de 2 m. (Figura 13), al que a su vez se le realizó un remuestreo por el método bilinear cúbico para su salida en el “Display”.

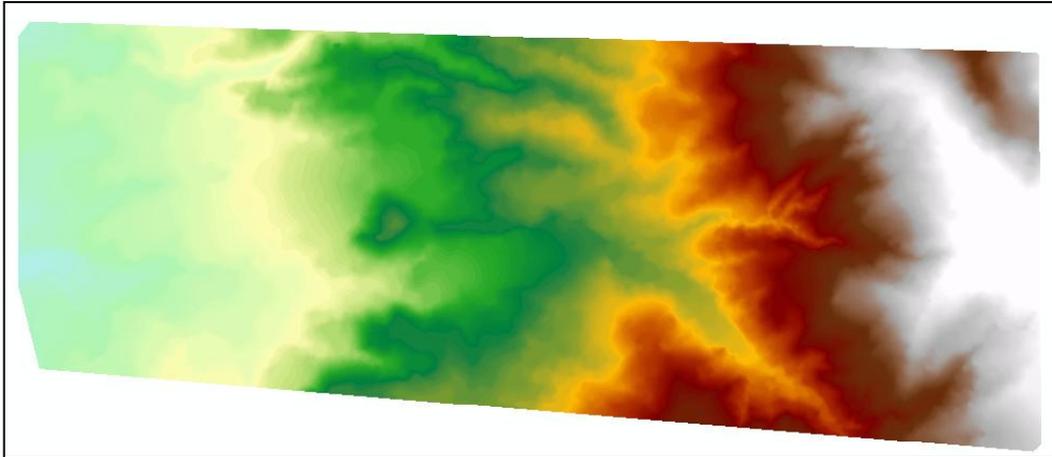


Figura 13. Creación de Raster de Elevación con tamaño de pixel de 2 m. para el modelo elaborado a partir del proceso fotogramétrico (1976).

La generación de curvas de nivel por medio de este método (para la sección correspondiente al área de estudio) permitió obtener la curva de nivel base de menor altitud 980 m. y la mayor en 1830 m.; el área cubierta de la cuenca fue de 6,81 km², la misma fue definida a partir de la intersección de esta con el perímetro correspondiente para la totalidad de la cuenca y el área restituida (Figura 14).

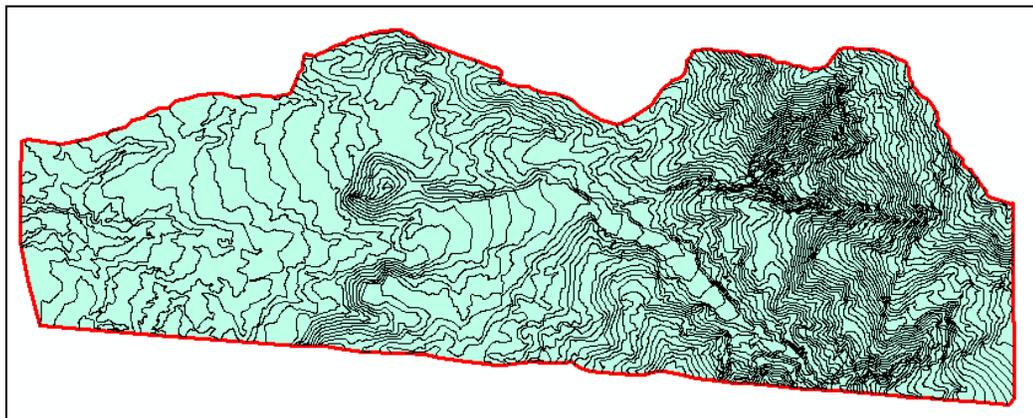


Figura 14. Generación de curvas de nivel para el área de estudio restituidas fotogramétricamente sobre fotos de misión 0102121 de 1976.

10.2.3. Evaluación de modelo por medio de los valores de celda en puntos de control conocidos

Con la existencia de puntos de control con altitudes conocidas en el área de estudio (presentados en formato vectorial), se procedió a comparar estos valores con la extracción de los valores de las celdas del raster “resta” para cada uno de los puntos, de forma automatizada (los pixeles situados bajo los puntos de control con ID **11, 15, 16** y **17** fueron excluidos por no haber quedado insertos en la intersección de áreas realizada para la obtención del área común).

Mediante este análisis se comprueba que la diferencia entre los pixeles generados no supera los 10 m. dando por sentado la correspondencia entre los valores conocidos, usados para el desarrollo del modelo fotogramétrico (Tabla 9 y Figura 15).

www.bdigital.ula.ve

Tabla 9. Valores de celda para los puntos de control.

NOMBRE	Longitud E	Latitud N	Altitud	Diferencia de altitud entre CT y MF
casa esq inf der	811177,27	863921,17	1177,5	0,72
casa esq sup izq	811067,06	863820,94	1174,0	0,40
casa esq sup izq	810902,46	863747,71	1164,5	0,86
casa esq inf	811721,01	864038,67	1231,1	1,34
casa esq sup izq	811092,29	864294,74	1202,0	3,75
casa angulo interno	811194,49	864387,46	1216,3	5,58
casa esq sup der	811405,48	864396,80	1216,9	3,51
casa esq inf izq	811667,86	864516,27	1270,4	0,00
Casa lejana (14b)	811762,98	863491,15	1372,0	2,49
Casa cerca de carcava	811997,84	863363,19	1374,8	5,48
Tanque (18b)	813255,53	863752,70	1614,0	9,85
Techo 2 (19b)	813258,54	863321,03	1600,0	6,74
Vaquera (20)	813021,96	863207,98	1519,0	8,89
casa B	811436,58	863831,27	1256,0	1,01
casa C	811049,37	863509,84	1219,0	1,04
casa F	810842,41	864306,99	1168,2	0,86
casa G	811207,30	864342,07	1212,5	1,62
casa E	810966,63	864214,00	1174,1	0,00
casa H	811850,20	864403,70	1281,2	1,40
casa J	810869,48	863780,78	1132,0	8,19
casa A	811180,75	863818,43	1204,5	4,28

Nota: CT= Modelo generado a partir de las Cartas TRANARG C.A. MF= Modelo obtenido por medio del proceso fotogramétrico.

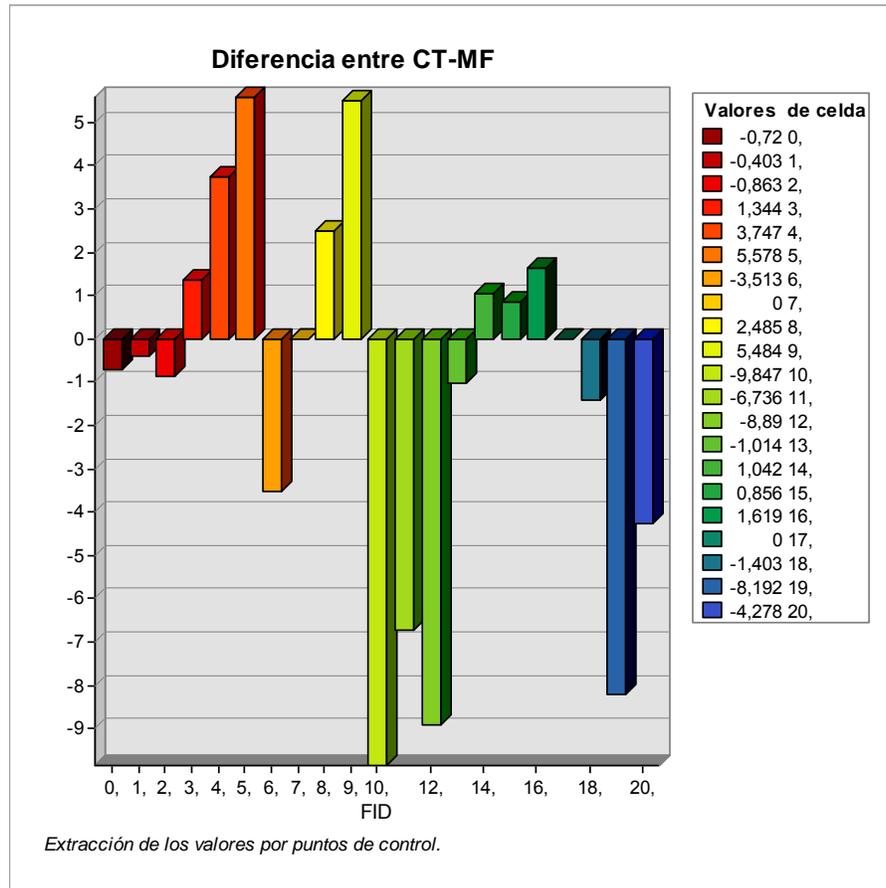


Figura 15. Extracción de valores de celdas por puntos de control.

10.2.4. Análisis exploratorio de datos espaciales sobre valores de celdas en puntos de control conocidos.

El análisis geostatístico como herramienta, otorgó un análisis exploratorio de los datos espaciales, además permitió cuantificar la calidad de los modelos superficiales midiendo sus errores estadísticos por medio de técnicas probabilísticas (métodos analíticos), a partir de ellas, se estudió, basado en el valor obtenido de la celda en los puntos muestrales para cada uno de los DEM (valor extraído por medio del modulo extracción de valores por punto), la comparación del grado de semejanza en la distribución de los valores de los dos conjuntos de datos, concluyéndose que estos guardan una estrecha relación, en donde no existen valores que se alejen entre sí, vale decir que no demuestran una significativa variabilidad entre las altitudes de los dos DEM en esos puntos (Figura 16).

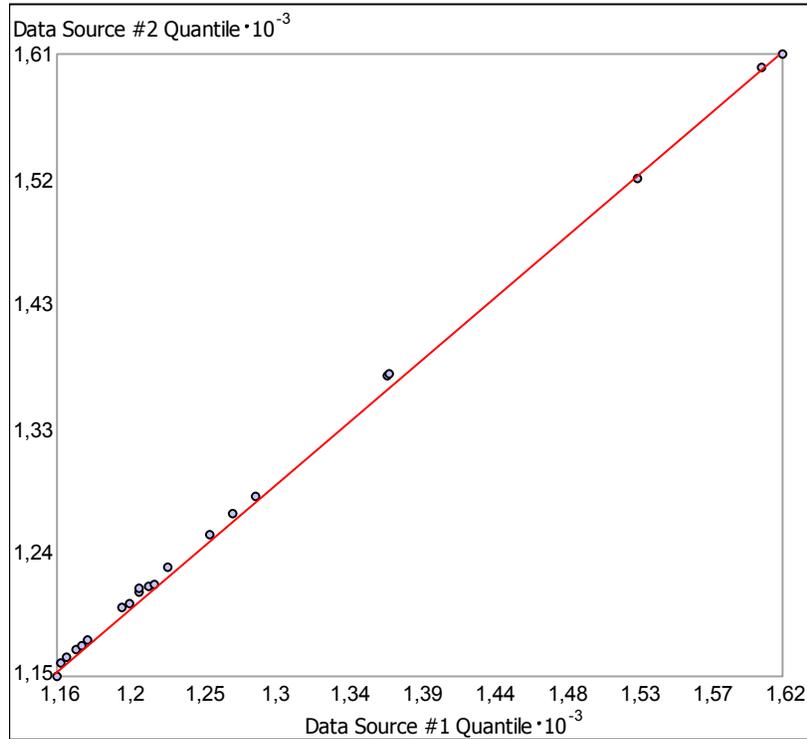


Figura 16. Gráfico de probabilidad general Q-Q. los cuales representan los cuantiles de una distribución. En el eje X se hallan los valores de las celdas del DEM fotocorre y en el eje Y los valores correspondientes al DEM CTcorre.

10.2.5. Análisis Exploratorio de datos espaciales sobre valores de celdas en puntos no conocidos, obtenidos por polígonos de Thiessen

El propósito de la generación de los polígonos de Thiessen, consistió en la generación de 25 nodos de intersección, que permitió constituirlo en la base de referencia, para la conformación de un nuevo archivo vectorial de puntos, los cuales permitieron repetir el análisis de comparación del grado de semejanza en la distribución de los valores de los dos conjuntos de datos, esta vez no conocidos fehacientemente, como lo fueron los “puntosvisibles” (Figura 17 y 18), resultando que al igual que los puntos conocidos, guardan una estrecha relación, en donde no existen valores que se alejen entre sí, vale decir que no demuestran una significativa variabilidad entre las altitudes de los dos DEM en esos puntos.

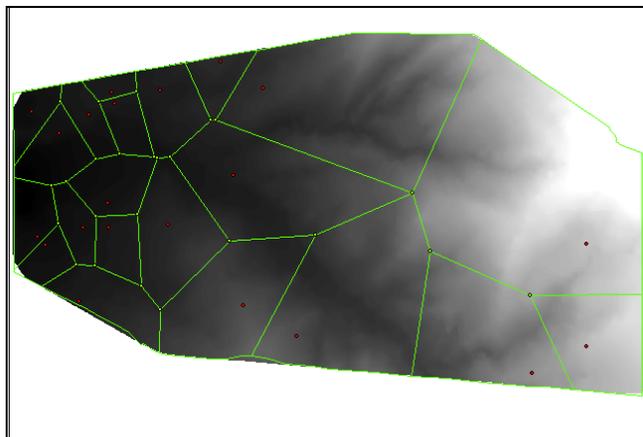


Figura 17. Puntos generados a partir de los vértices de los nodos de los polígonos de Thiessen (Verde). Los polígonos partieron de los puntos conocidos denominados como “puntosvisibles” (Rojo).

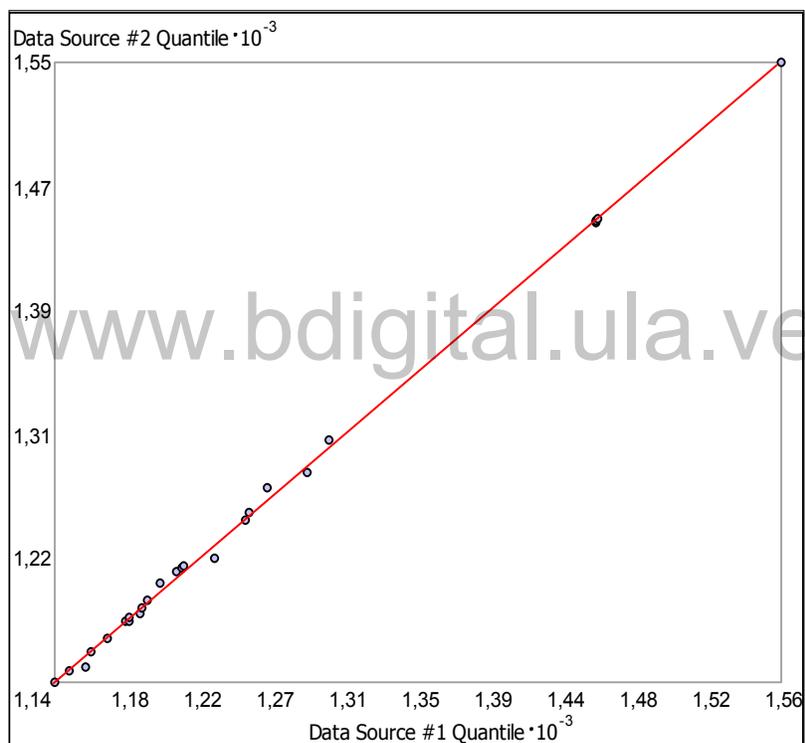


Figura 18. Gráfico de probabilidad general Q-Q. los cuales representan los cuantiles de una distribución. En el eje X se hallan los valores de las celdas del DEM fotocorre y en el eje Y los valores correspondientes al DEM CTcorre basados sobre los 25 puntos obtenidos por medio de los polígonos de Thiessen.

10.2.6. Estimación de Volumen en área coincidente entre los DEMs de los años 1971 y 1976

Yuxtaponiendo las áreas obtenidas correspondientes al método de digitalización de curvas de nivel realizado por TRANARG C.A. (desarrollado en 1971) y el desarrollado por software fotogramétrico (desarrollado actualmente sobre las fotografías aéreas del año 1976), se evidenció una intersección oscilante entre ambas áreas de $\pm 46\%$ siendo el área cubierta de de $6,01 \text{ km}^2$ resultado de este geoproceto (Figura 19).



Figura 19. Generación de mascarar e intersección de las mismas para la obtención del área común a ser evaluada (área donde se elaboró el TIN y posterior DEM).

Los raster creados no fueron coincidentes tanto en número de columnas y filas, por consiguiente el total de celdas en ambos casos varía, lo que ameritó de un proceso de corrección nuevamente por medio de enmascarado entre ambos raster para obtener raster con las mismas dimensiones (DEM Tranarg =1.383 columnas x 758 filas; DEM foto=1.382 columnas x 761 filas) (Figura 20).

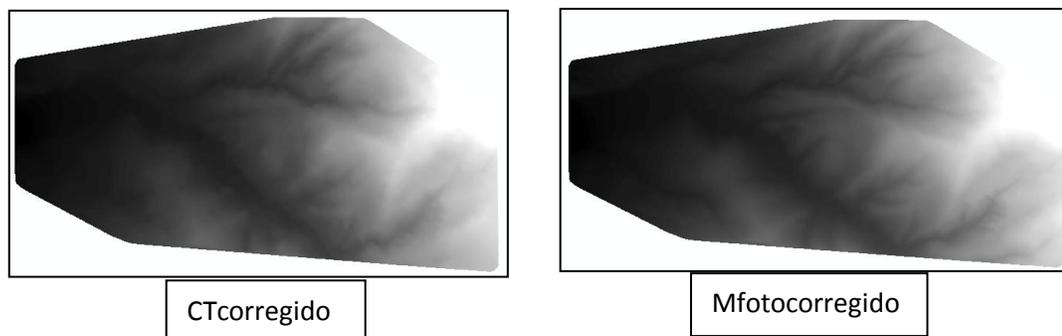


Figura 20. Corrección de los raster Tragnar (1971) y modelo fotogramétrico (1976). Columnas: 1382 y filas: 758 en ambos.

Con los DEM ya corregidos y aplicando métodos propios desarrollados por los SIG, se estimó el área, la superficie de las áreas y el volumen en ambos DEM, a fin de establecer la diferencia entre ellos (Tabla 10).

Tabla 10. Evaluación y Comparación de los valores de Área 2D, Superficie de Área y Volumen del Modelo digitalización de curvas de nivel (1971) y el Modelo fotogramétrico digital (1976).

Método aplicado	Área 2D (hectáreas)	Superficie de área (hectáreas)	Volumen (hectómetros cúbicos)
modelo tranarg (1971)	340,84	392,79	874,14
modelo Foto (1976)	340,42	390,53	882,27
diferencia	0,42	2,25	8,13
M. Tranarg coorregido (1971)	340,17	389,51	872,14
M. foto corregido (1976)	340,17	390,09	881,55
diferencia	0,0000	0,5788	9,41

Aunado al proceso de comparación como medio de evaluación de los DEM, se procedió a comparar los estadísticos descriptivos (Mínimo, Máximo, Media y Desviación Estándar) expresados en metros para ambos métodos, resultando estos muy similares, salvo el caso de los valores máximos de elevación en donde “**Mfotocorregido**” supera en 10 metros a “**CTcorregido**” producto de la edición por medio del proceso fotogramétrico digital; estas primeras conclusiones en añadidura

a la coherencia visual existente entre los raster desplegados en el “Display” dentro del Sistema de Información Geográfica. (Tabla 11).

Tabla 11. Estadísticos descriptivos de los DEMs generados.

CT corregido (1971)		Mfotcorregido (1976)		Diferencia(1971 - 1976)	
Estadísticas	Valor	Estadísticas	Valor	Estadísticas	Valor
min	1130	min	1130	min	-79,7
max	1820	max	1830	max	33,16
media	1386,48	media	1389,24	media	-2,76
Std. desviation	165,8	Std. desviation	168,51	Std. desviation	7,02

Dado a que los modelos fueron generados por métodos diferentes, se hizo perentorio realizar una sustracción entre ambos DEMs a fin de observar la diferencia existente entre los valores de elevación para cada celda, la misma fue aplicada por medio de un calculadora de algebra de mapas (herramienta de crucial importancia dentro de los SIG, donde **resta = Ctcorregido - Mfotcorregido**) obteniéndose valores que van desde los 33,16 m como diferencia máxima encontrada hasta los -79,7 m. como la mínima.

Los valores negativos generados son el producto de la determinación de un raster como valor de minuendo, en este caso el año 1971 y el modelo del año 1976 como sustraendo, a partir de la idea de asumir que el volumen presentado por este ultimo año, debiera ser menor en relación al anterior por la pérdida de suelo y/o roca resultado de los procesos de erosión (Figura 21 y Tabla 9).

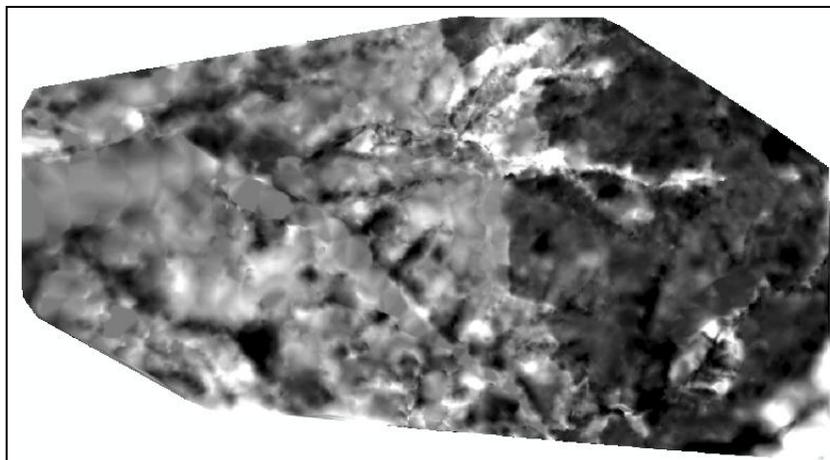


Figura 21. Sustracción generada entre el DEM CT corregido y Mfot corregido.

Para lograr un análisis de la calidad de la sustracción entre los DEMs, se reclasificó los valores de celdas existentes en cinco (5) clases, que expresan la distribución que poseen las diferencias de celdas en el área de estudio y el área total que abarcan las clases. Dicha información constituye un dato crucial para determinar si existe una buena cantidad de celdas representando el EMCT (valores comprendidos entre -0,62 y 0,62 m.), el cual es el rango de valor que expresa que efectivamente que el valor de altitud de una celda no presentó cambios, y valores comprendidos entre estos hasta los -10 o 10 m. que pudieran asumirse como valores para aceptar los modelos (Figura 22 y 23).

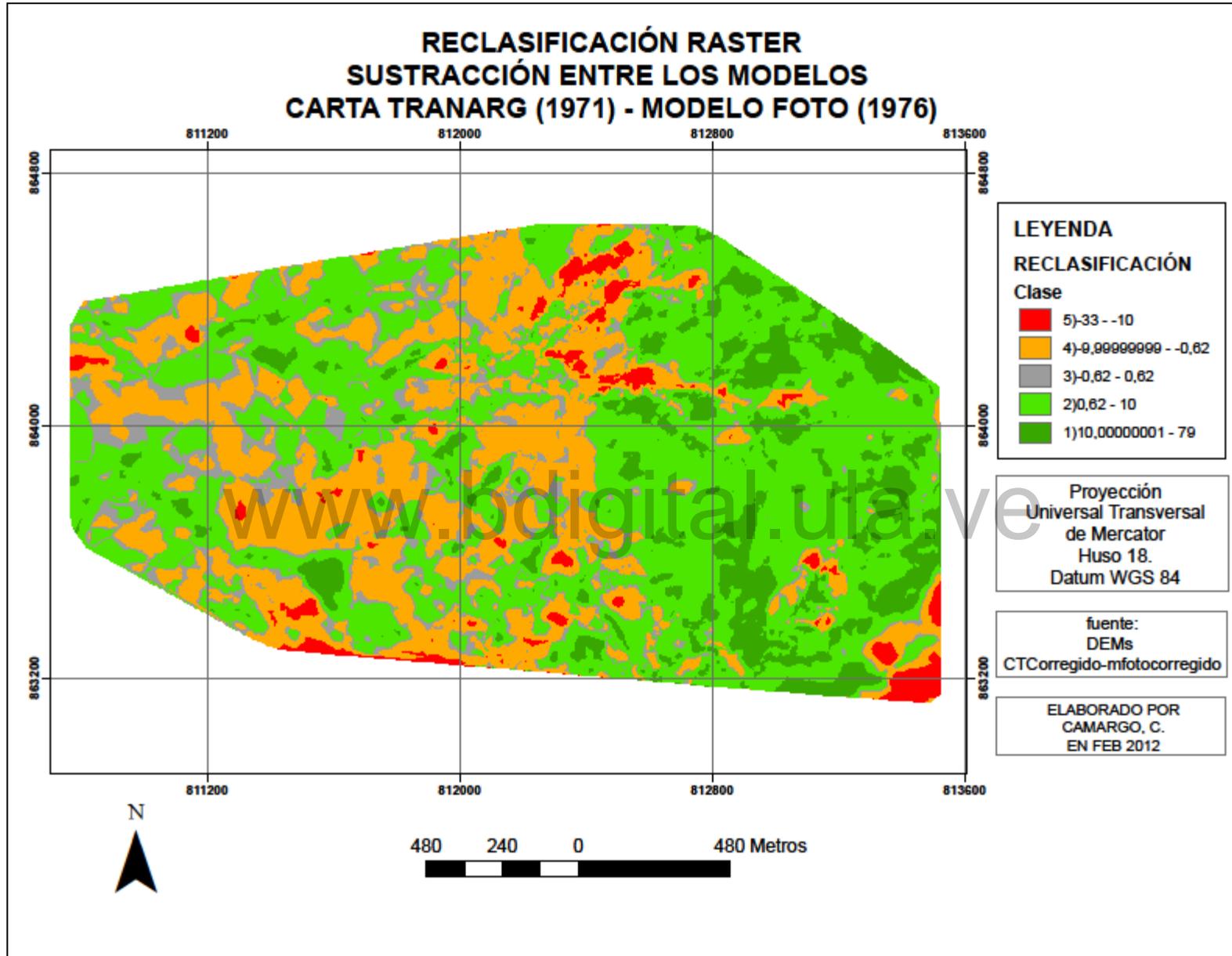


Figura 22. Valores reclasificados en 5 clases. Sustracción entre los modelos de área en común con respecto al área total de la cuenca.

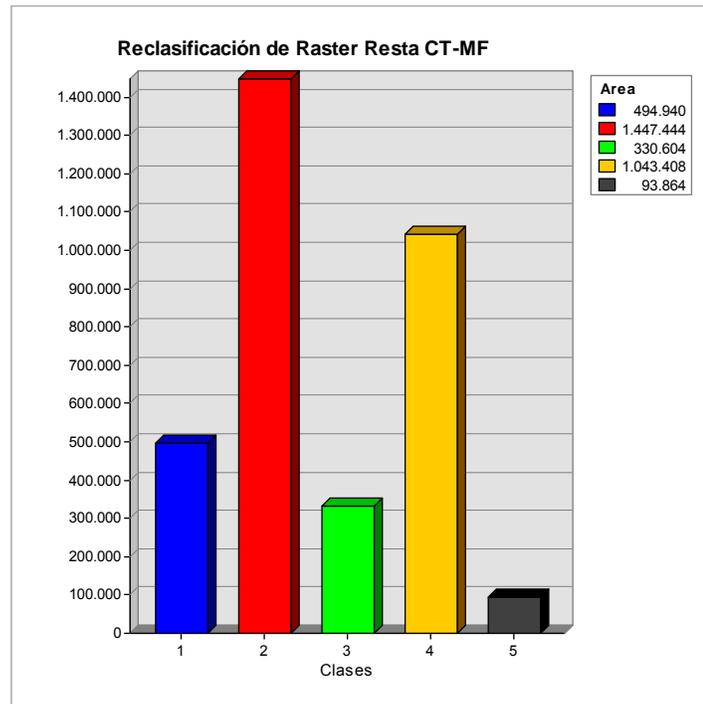


Figura 23. Reclasificación en 5 clases.

La reclasificación, considerando el EMCT de -0,62 m. a 0,62 m, como una clase y clases subsiguientes en valores que van desde estos a los -10 m. y a los 10 m. y finalizando con clases extremas que van desde los mencionados a los 33 m. o los -79 m. de diferencia, permitió vislumbrar de mejor modo, la relación entre ambos modelos; Se obtuvo que para la clase que responde al EMCT identificada como clase 3, el porcentaje de coincidencia entre ambos modelos fue del 9,69%, prosiguiendo con un 73,03% entre los límites de este rango y el límite fijado de 10 m. (Clases 2 y 4) con el cual hace aceptable al modelo generado por fotogrametría digital, para finalmente arrojar como resultados extremos de diferencia un 17,26% (Clases 1 y 4). (Tabla 12).

Tabla 12. Área y porcentajes de la reclasificación en 5 clases.

VALOR	RANGO	AREA (hectáreas)	%
1	-79,699 a -10	49,49	14,51
2	-10 a -0,62	144,74	42,44
3	-0,62 a 0,62	33,06	9,69
4	0,62 a 10	104,34	30,60
5	10 a 33,163	9,39	2,75
	Total	341,03	100

Asumiendo que las diferencias (todas aquellas clases excluyendo la tercera) son el resultado de la sumatoria de los errores: distribución espacial de los puntos de control señalados para el proceso fotogramétrico aplicado para la restitución de las curvas de nivel sobre la misión 0102121, seguido del error generado a partir del método de interpolación aplicado durante el mismo y el error resultante originado por el comportamiento local de los procesos de erosión en el área de estudio, hicieron necesario observar cómo se distribuyeron espacialmente las clases en el área, para ello, se hizo intervenir la ortofoto generada y los puntos de control usados durante el proceso fotogramétrico incluidos en el área (Figura 24).

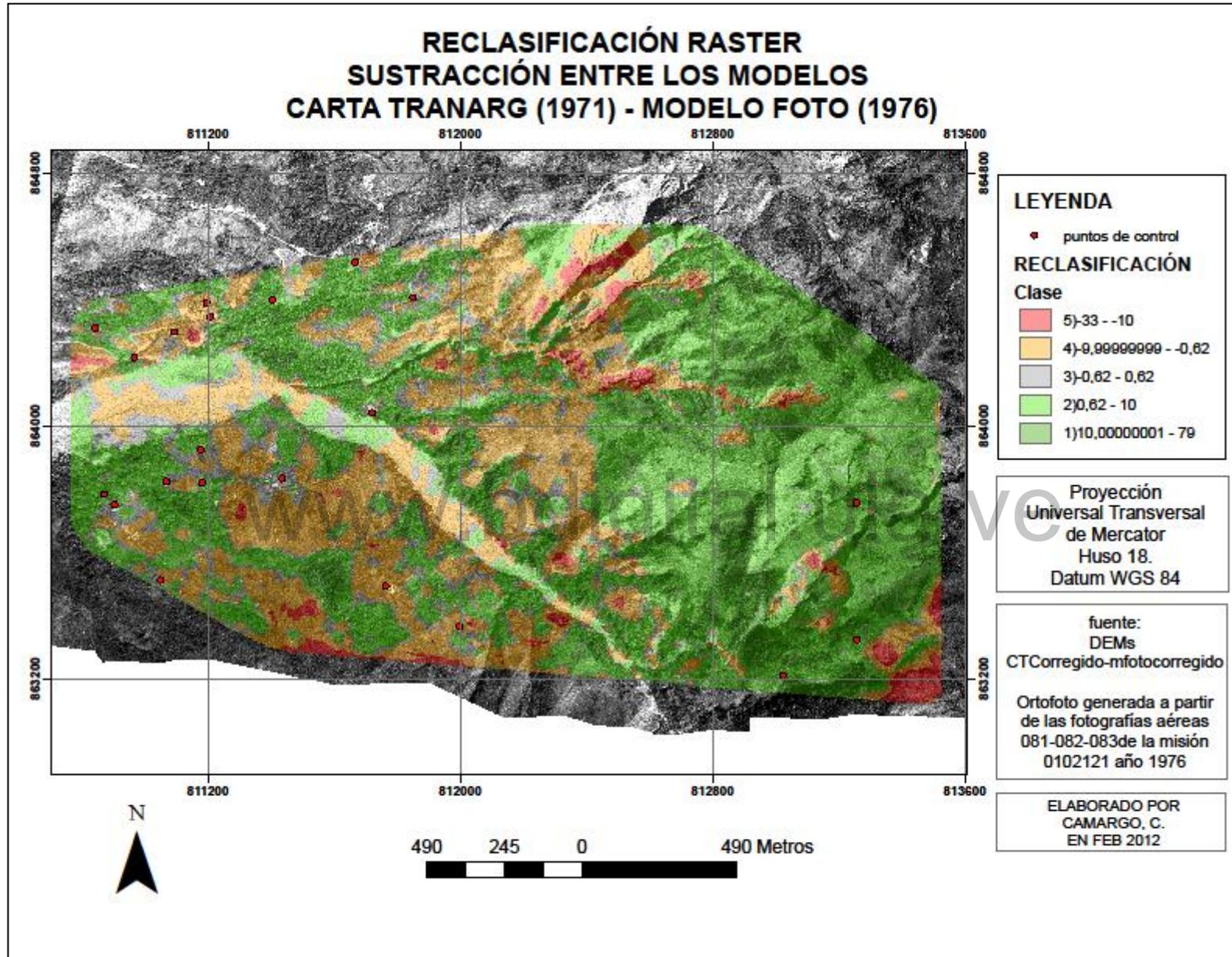


Figura 24. Reclasificación en 5 clases sobre ortofoto y con puntos de control de área en común con respecto al área total de la cuenca.

Se concluye a partir de la interpretación visual, que efectivamente buena parte del error corresponden a la desigual distribución de los puntos de control empleados en el desarrollo del proceso fotogramétrico aplicado sobre la misión 0102121 (1976), los cuales fueron los mismos usados en el proceso de restitución llevada a cabo años antes por TRANARG. C.A. (1971).

En ambos casos, los puntos se hayan distribuidos y concentrados en su mayoría en la zona baja, posibilitados a partir de la existencia de vías de comunicación, caso contrario, no ocurrió en las zonas montañosas y en las áreas que presentan cárcavas, donde la dificultad de acceso y las pendientes abruptas, impidieron situar puntos de control que pudieran mejorar el resultado del proceso de interpolación y con ello, una restitución más adecuada de las curvas de nivel.

La falta de una mejor distribución espacial de los puntos de control, la cual es entendible además, obligó a realizar un análisis por zonas, excluyendo aquellas áreas de grandes diferencias señaladas por las clases; concentrando el análisis en aquellas áreas de fácil acceso para la determinación de puntos de control (áreas 1 y 2 del mapa temático) y también en el área de la cárcava “Los Pinos” (área Los Pinos del mapa temático) por ser esta de interés en el estudio, pero que sin embargo no contó con punto de control alguno (Tabla 13 y Figura 25).

Tabla 13. Coordenadas de extensión de áreas a estudiar.

área 1	Coordenadas UTM	área 2	Coordenadas UTM	área Los Pinos	Coordenadas UTM
norte	864567,3747	norte	864073,6913	norte	864633,4318
oeste	810793,7956	oeste	810793,6412	oeste	811452,7226
este	811899,7956	este	811513,6412	este	812858,7226
sur	863699,3747	sur	863641,6913	sur	864097,4318

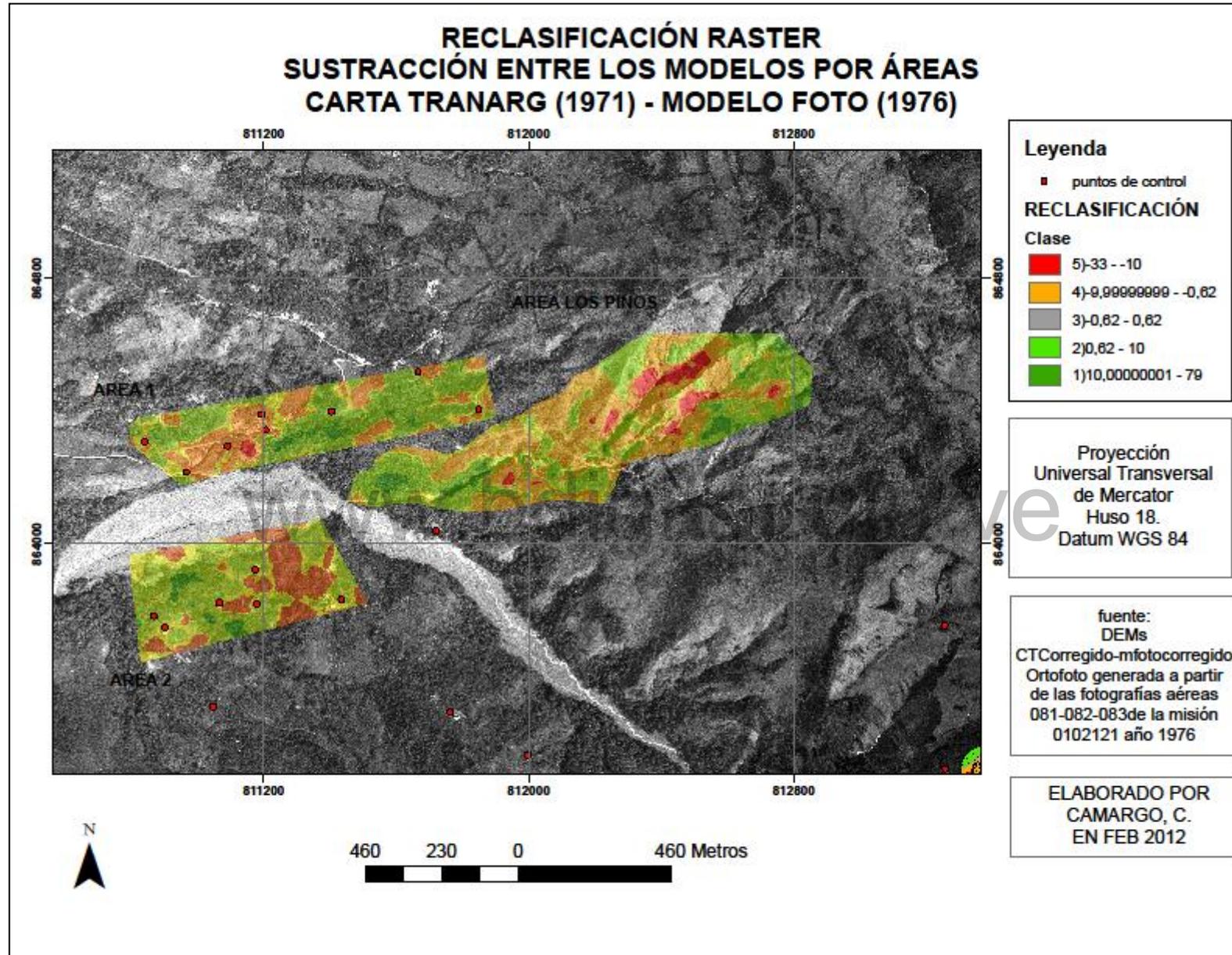


Figura 25. Reclasificación en 5 clases para tres áreas sobre ortofoto y con puntos de control.

Tomando en consideración la reclasificación para las áreas divididas, se encontraron los siguientes resultados:

Tabla 14. Área y porcentajes de la reclasificación en 5 clases para área 1.

Valor	Clase	Celdas	Área	%
1	-79,699 a -10	1873	7492	3,49
2	-10 a -0,62	26354	105416	49,06
3	-0,62 a 0,62	8802	35208	16,38
4	0,62 a 10	16234	64936	30,22
5	10 a 33,163	459	1836	0,85
	total	53722	214888	100

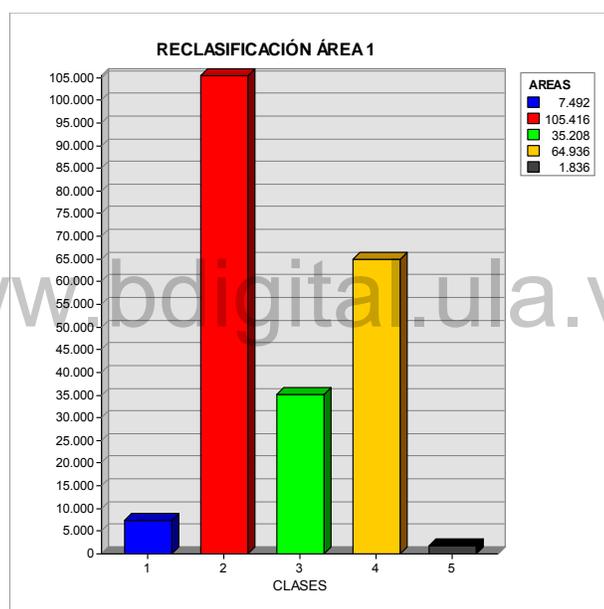


Figura 26. Reclasificación en 5 clases para área 1.

Tabla 15. Área y porcentajes de la reclasificación en 5 clases para área 2.

Valor	Clase	Celdas	Área	%
1	-79,699 a -10	1981	7924	4,06
2	-10 a -0,62	23403	93612	47,99
3	-0,62 a 0,62	10007	40028	20,52
4	0,62 a 10	13380	53520	27,43
5	10 a 33,163	0	0	0,00
	total	48771	195084	100,00

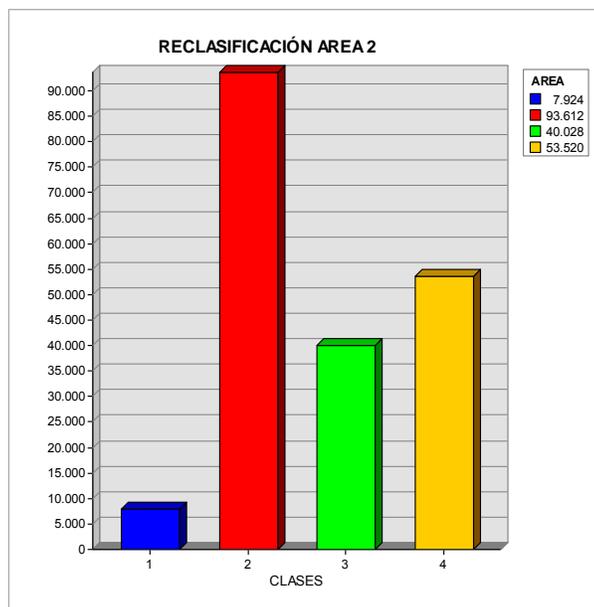


Figura 27. Reclasificación en 5 clases para área 2

Tabla 16. Área y porcentajes de la reclasificación en 5 clases para área “Los Pinos”.

Valor	Clase	Celdas	Área	%
1	-79,699 a -10	4862	19448	5,18
2	-10 a -0,62	33584	134336	35,75
3	-0,62 a 0,62	9756	39024	10,39
4	0,62 a 10	40144	160576	42,74
5	10 a 33,163	5590	22360	5,95
	total	93936	375744	100,00

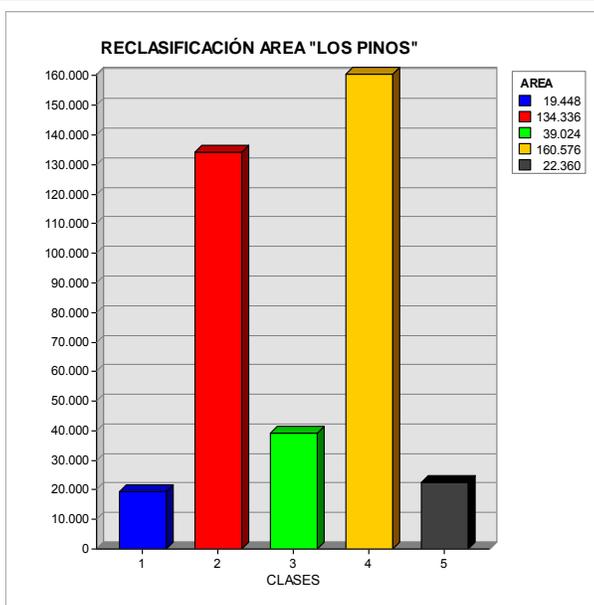


Figura 28. Reclasificación en 5 clases para área “Los Pinos”.

Analizando los resultados obtenidos para las áreas 1, 2 y “Los Pinos”, se corroboró la presunción hecha a partir del análisis visual para el área de estudio en conjunto expresado en la reclasificación, una desigual distribución de los puntos de control usados en el proceso de desarrollo fotogramétrico generaron las diferencias significativas.

El análisis por separado (despreciando en buena parte aquellas zonas al oriente de la cárcava “Los Pinos”), permitió corroborar que es efectivamente la desigual distribución de los puntos de control lo que otorgan un peso considerable en el error del modelo obtenido por medio del proceso fotogramétrico, pues tanto para el área 1 y 2, la clase 3 comprendida entre $-0,62$ y $0,62$ oscila entre 16 y 20%, dicha clase es la manifestación de la muestra de celdas sin diferencias existentes entre ambos modelos, por otro lado, la misma clase para el área “Los Pinos” denota un valor menor (10,39%).

Asumiendo el criterio de las clases subsiguientes (sumatoria de las clases 2 y 4) para las áreas 1, 2 y “Los Pinos”, éstas presentaron un valor comprendido entre el 75 y 80%, lo que las hacen similares entre sí, impidiendo realizar una conclusión más exhaustiva sobre el modelo. Por el contrario, las clases 1 y 3, las cuales expresan las mayores diferencias existentes entre ambos modelos, en las áreas 1 y 2 no superan al 5 %; en cuanto al área “Los Pinos” carente de puntos de control, el resultado es mucho mayor (11% aproximadamente).

El análisis fue finalizado en primer lugar con la estimación de las estadísticas descriptivas (mínimo, máximo, media y desviación estándar) para las tres áreas definidas, hallándose en primer lugar diferencias oscilantes en los valores mínimos a 1 m. en los tres modelos; seguidamente los valores máximos presentaron una

similitud para las áreas 1 y 2, pues estos también fluctuaron en 1 m. y mostrando una diferencia mayor de 6 m. en el área “Los Pinos”. En cuanto a los valores de media aritmética y desviación típica, existe una diferencia aproximada a 1 o 2 m. en los tres modelos (Tabla 17).

Se corrobora con estos primeros datos, que las áreas que contaron con la presencia de puntos de control y una distribución homogénea de los mismos en las áreas 1 y 2, permitieron desarrollar modelos más satisfactorios, caso inverso a los datos suministrados por el área “Los Pinos” donde la diferencia entre los valores máximos hace presumir la existencia de errores generados a partir del proceso de interpolación y restitución de las curvas de nivel empleado durante el proceso fotogramétrico; la diferencia de 6 m, hace variar considerablemente la superficie de área y el volumen entre el modelo desarrollado por TRANARG C.A. y el modelo hecho a partir de las fotografías aéreas.

Tabla 17. Estadísticos descriptivos de los DEMs Área 1, Área 2 y Área “Los Pinos”.

Area 1			
	CT corregido		Mfotcorregido
Estadísticas	Valor	Estadísticas	Valor
min	1150	min	1151,24
max	1301,73	max	1301,56
media	1218,37	media	1220,11
Std. desviation	34,12	Std. desviation	34,32
Area 2			
	CT corregido		Mfotcorregido
Estadísticas	Valor	Estadísticas	Valor
min	1130	min	1130
max	1270	max	1267,86
media	1180,25	media	1181,87
Std. desviation	32,89	Std. desviation	31,58
Area Los Pinos			
	CT corregido		Mfotcorregido
Estadísticas	Valor	Estadísticas	Valor
min	1191,08	min	1190
max	1589,64	max	1595,74
media	1363,14	media	1362,96
Std. desviation	98,92	Std. desviation	99,18

En cuanto a las superficies de las áreas en ambos DEMs en las tres áreas, se encontró que para el primer caso en el área 1, la diferencia entre los DEMs presentó una diferencia aproximada de 5.000 m.², siendo esta dimensión la mayor encontrada; para área 2, la diferencia de superficie fue de 475 m.², y finalmente área “Los Pinos” presentó una diferencia de área de 1.851 m.². Haciendo alusión a los volúmenes, se halló que la diferencia entre los DEMs para área 1 (área con mayor y mejor distribución de puntos de control) resultó ser menor con 0,11 hm.³ que área 2 que contó con 0,31 hm.³ y área “Los Pinos” con aproximadamente 0,33 hm.³. (Tabla 18).

Tabla 18. Evaluación y Comparación de los valores de Área 2D, Superficie de Área y Volumen del Modelo digitalización de curvas de nivel (1971) y el Modelo fotogramétrico digital (1976) para las áreas 1,2 y “Los Pinos”.

Área 1			
Método Aplicado	Área 2D (metros cuadrados)	Superficie de área (metros cuadrados)	Volumen (hectómetros cúbicos)
M. Tranarg corregido (1971)	211896,00	226721,95	14,48
M. foto corregido (1976)	211896,00	221636,81	14,59
diferencia	0,00	5085,14	-0,11
Área 2			
Método Aplicado	Área 2D (metros cuadrados)	Superficie de área (metros cuadrados)	Volumen (hectómetros cúbicos)
M. Tranarg corregido (1971)	192784,00	200088,38	9,67
M. foto corregido (1976)	192784,00	199613,35	9,99
diferencia	0,00	475,03	-0,31
Área Los Pinos			
Método Aplicado	Área 2D (metros cuadrados)	Superficie de área (metros cuadrados)	Volumen (hectómetros cúbicos)
M. Tranarg corregido (1971)	371760,00	456589,09	63,93
M. foto corregido (1976)	371760,00	458441,40	64,25
diferencia	0,00	-1852,31	-0,33

Los resultados obtenidos en superficie de área impiden definir la validez de los volúmenes obtenidos, pues en zonas como área 1, donde no se desarrollan procesos de erosión, la existencia de una diferencia de 5.000 m.² en contraposición a los

1.853 m.² de un área como “Los Pinos” donde los procesos de erosión sí han sido concentrados, genera una gran incertidumbre. El área 2, manifiesta apenas 475 m.², gracias a que el terreno representado presenta un relieve más uniforme que pueda explicar dicho valor en contraposición a los valores anteriormente señalados, sin embargo, persiste la duda sobre aceptar o no los resultados en cada uno de los casos.

10.2.7. Geoestadística de puntos

10.2.7.1. Análisis de Mínima Distancia

La aplicación del análisis de mínima distancia, otorgó una descripción a través de valores, lo observado gráficamente (Figura 29 y Tabla 19).

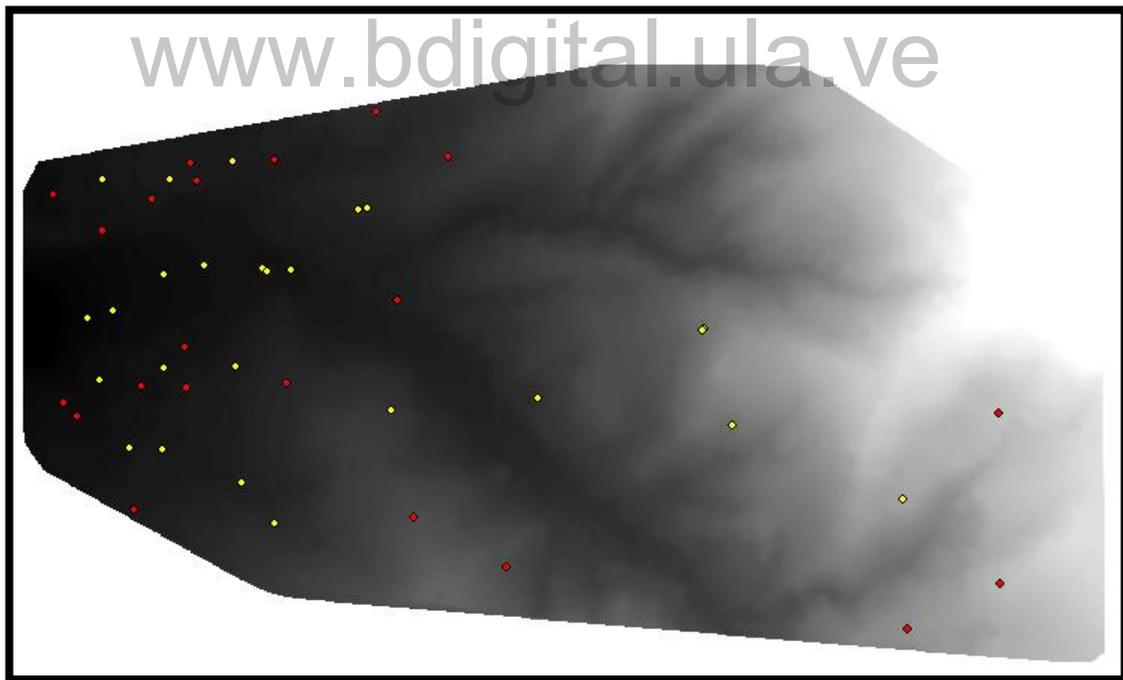


Figura 29. Raster conteniendo los puntos de control (Puntos rojos) y los puntos generados a partir de los nodos de los polígonos de Thiessen.

Nombre	Valor	Nombre	Valor
Media	188,04165177	Media	136,13348658
Minimum	46,70103454	Minimum	3,95941699
Maximum	431,67188114	Maximum	473,23675621
Standard Deviation	104,85845120	Standard Deviation	120,30552720
Duplicates	0,00000000	Duplicates	0,00000000

Tabla 19. Análisis de mínima distancia para puntos de control (izquierda) y para puntos generados por polígonos de Thiessen (derecha).

10.2.7.2. Análisis de Patrones espaciales

El Análisis de Patrones Espaciales de puntos, permitió conocer cómo se distribuyen los puntos de control terrestre (Figura 30) y puntos generados por los polígonos de Thiessen (Figura 31), en ambas figuras se observa claramente una distribución espacial no homogénea para ambos grupos de puntos, ubicándose estos en el sector oeste de la cuenca (círculo cian y círculo verde), también se determinó el centro y el alcance espacial de los mismos (Figuras 30 y 31).

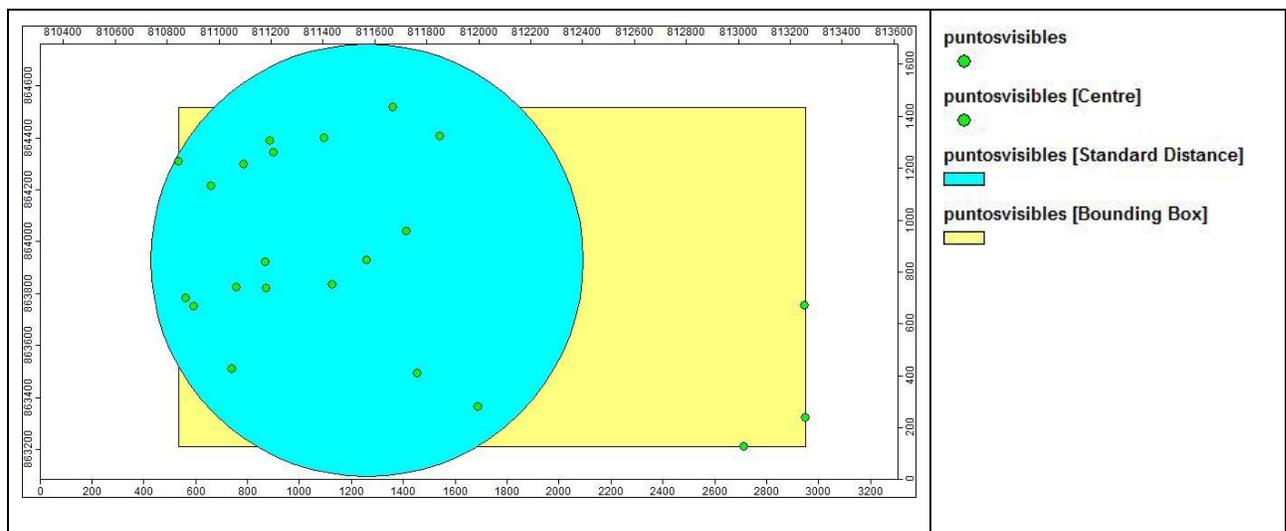


Figura 30. Análisis de Patrones Espaciales para puntos de control.

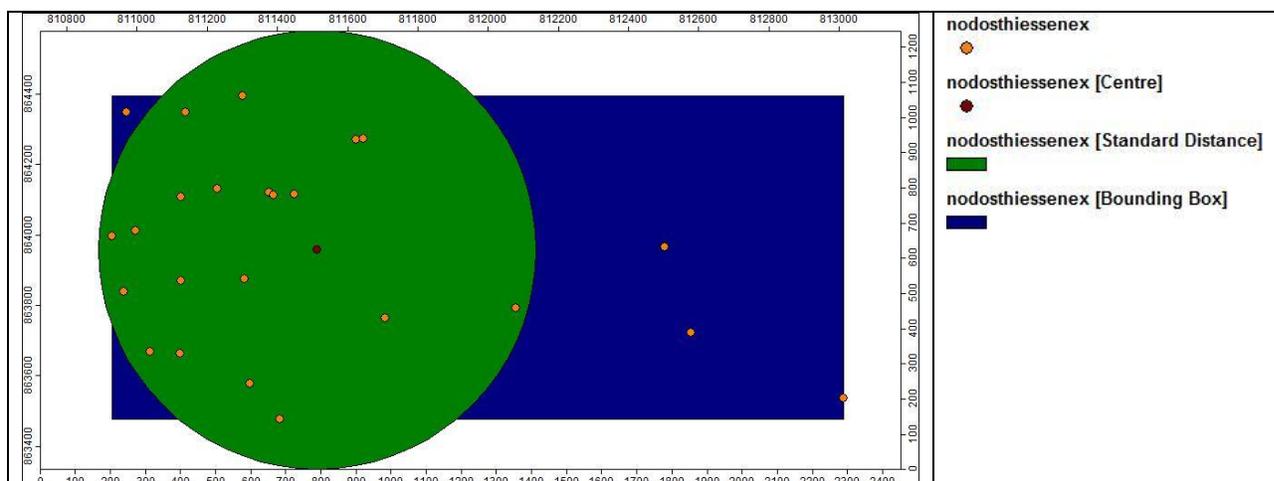


Figura 31. Análisis de Patrones Espaciales para puntos generados por polígonos de Thiessen.

10.2.7.3. Variograma

El variograma generado para los puntos de control, generó como conclusión que a diferentes distancias, se presentan diferentes valores de varianza y a su vez, dentro de aquellos que tienen poca distancia, se señalan altas diferencias entre sí, denotando de este modo una autocorrelación espacial baja y desordenada (Figura 32).

Por el contrario, el variograma para los puntos obtenidos a través de los polígonos de Thiessen, arrojó como resultado que a menor distancia, los valores de varianza tienden a ser menores y aumenta esta, a medida que se incrementa la distancia entre los pares de puntos. El variograma también permitió constatar un orden y cumplimiento del principio de auto correlación espacial, pues puntos más próximos tienen más correlación entre sí, que aquellos que se hallan más distantes.

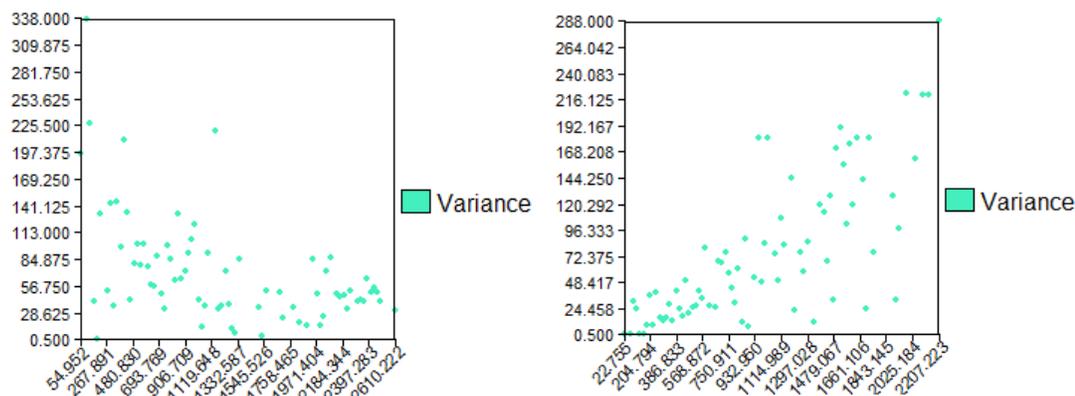


Figura 32. Semivariograma obtenido para puntos de control (izquierda) y para para puntos obtenidos a través de los polígonos de Thiessen (derecha).

10.2.7.4. Superficie Variográfica

A partir de la aplicación de este módulo, se pudo constatar para los puntos de control una alta varianza en dirección Oeste-Este, corroborando la baja correlación entre los mismos, conclusión ofrecida en forma a priori por el variograma, siendo claramente la varianza mayor en el centro de la cuenca. Por el contrario los puntos de control generados a partir de los nodos de los polígonos de Thiessen manifiestan un varianza cercana en los valores próximos y una varianza alta a medida que aumenta las distancias, siendo mayor ésta a los extremos de la cuenca. En ambos casos se hace evidente que los datos presentan anisotropía, en el caso de los Puntos de Control Este-Oeste y en el caso de los polígonos de Thiessen Norte-Sur y es siendo ésta mucho más isotrópica que los puntos de control terrestre (Figuras 33 y 34).

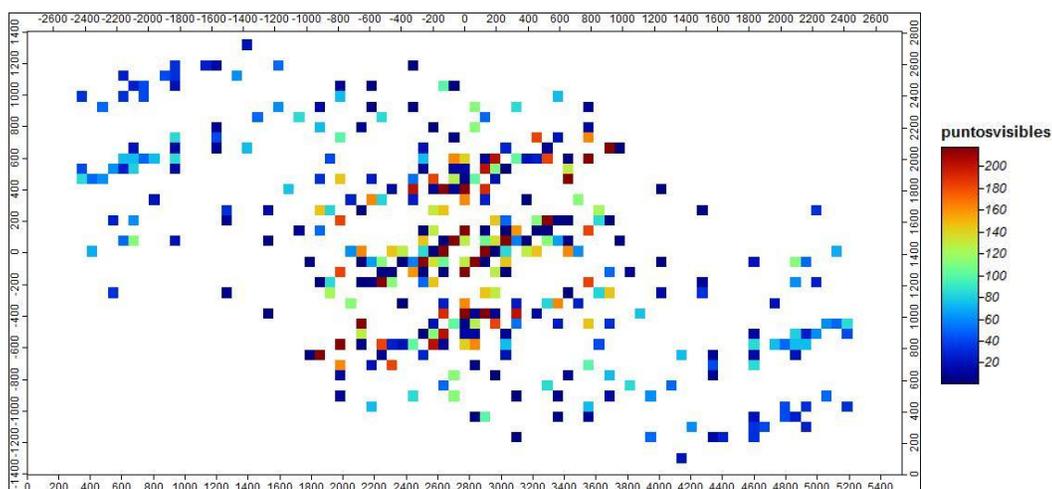


Figura 33. Superficie semivariográfica para los puntos de control.

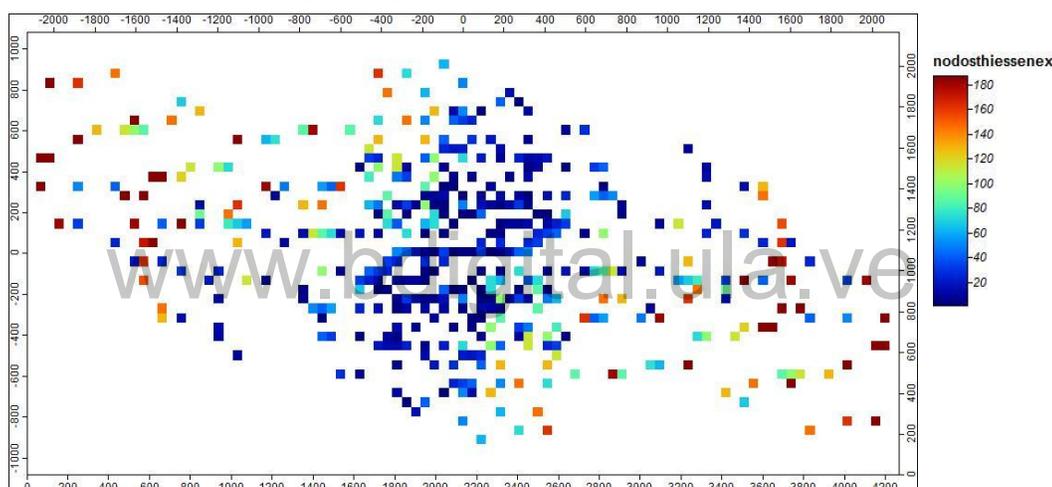


Figura 34. Superficie semivariográfica para los puntos extraídos a partir de los polígonos de Thiessen.

Este análisis hace retomar efectivamente que la presencia de puntos de control distribuidos en la forma de los puntos obtenidos a través de los nodos de los polígonos de Thiessen, hubiera permitido obtener un modelo de curvas de nivel y posterior modelo digital de elevación más confiable pues este incluiría mayor contenido de la variación espacial del terreno. Incluso se puede corroborar que la inclusión de solo 3 puntos de control (Figura 35), hubiera mejorado sustancialmente los modelos generados dado que la desviación promedio de los puntos no estarían tan desviados hacia la izquierda, esta conclusión también ofrece

indirectamente como resultado, que es esa área en particular donde se concentra buena parte el error en la distribución de los puntos de control, es decir, los puntos de control no representan totalmente la superficie del terreno.

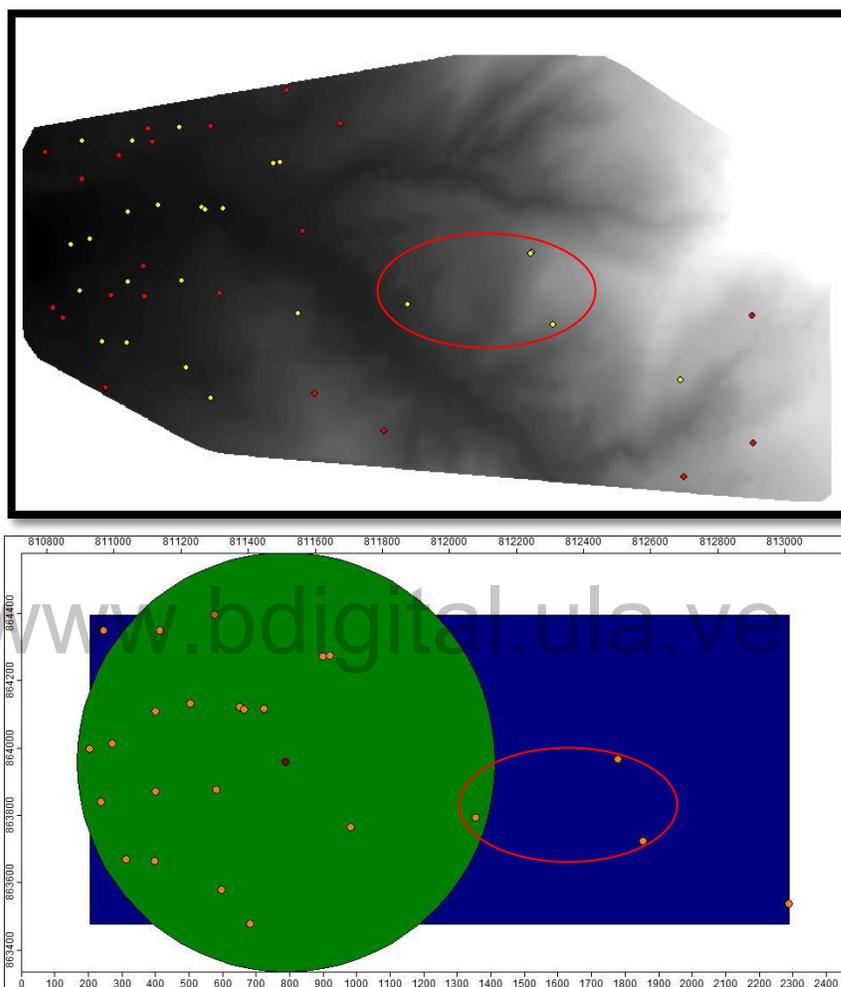


Figura 35. Área y puntos que mejorarían el modelo de curvas de nivel y DEM obtenido para el año 1976

10.3. Generación de ortofoto

Se obtuvo tres Ortofotos denominadas ortofoto 2, ortofoto 3 y ortofoto 5, generados a partir del proceso fotogramétrico sugerido por Hernández (2008a y 2008b) sobre las fotos 081,082, 083 pertenecientes a la misión 0102121 de 1976, dichas Ortofotos en conjunto cubren no solo buena parte del área correspondiente a la micro-cuenca torrencial “La Machirí” sino a micro-cuencas al norte de esta, tales son el caso de “La Chivata y “La Blanca” (Figura 36).

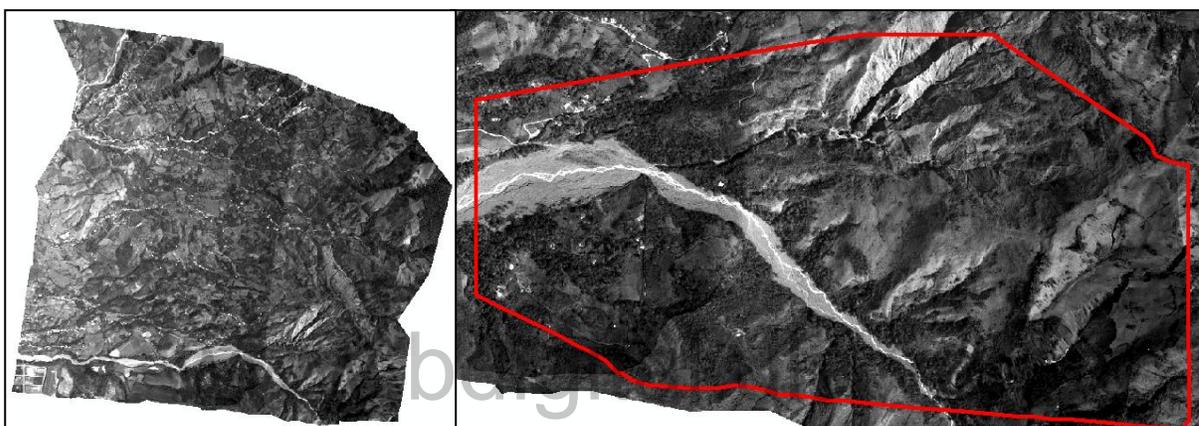


Figura 36. Lado izquierdo: ortofoto obtenida mediante el proceso fotogramétrico. Lado derecho: resultado de la intersección de las áreas coincidentes para la obtención del área común mostrada sobre la ortofoto generada a partir de la misión 0102121 de 1976.

10.4. Fotografías aéreas de misiones A-34 y 0102138 georeferenciadas y corregidas

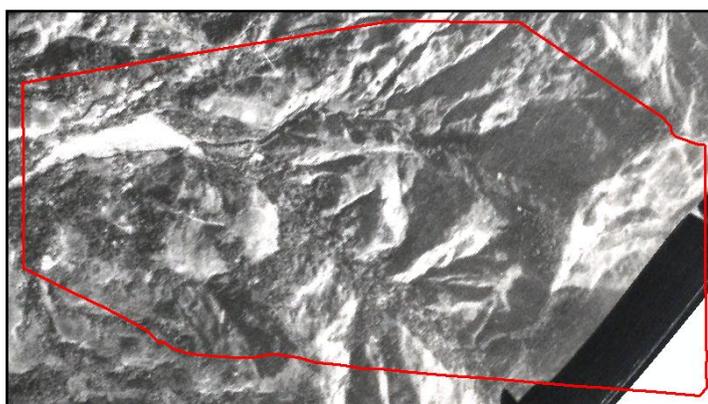


Figura 37. Resultado de la intersección de las áreas coincidentes para la obtención del área común mostrada sobre la ortofoto generada para la misión A-34 de 1952 (foto 804).



Figura 38. Resultado de la intersección de las áreas coincidentes para la obtención del área común mostrada sobre la ortofoto generada para la misión 0102138 de 1983 (foto 132).

10.5. Estado de los procesos de erosión

La determinación del estado de erosión se realizó para un área de 6,1 km² (resultado del área abarcada por la ortofoto dentro de la cuenca), para los años 1952, 1976 y 2010, constituyendo a su vez un estudio multitemporal de intervalos aproximados de 24 años entre estos (no se incluyó en el estudio la fotografía georeferenciada del año 1983).

En vista a la no existencia de un registro que señalara los inicios de los procesos de erosión y la magnitud de los mismos, este obstáculo impidió realizar una distinción entre **procesos activos** y **reactivados** para el año 1952 y 1976, donde los procesos de erosión se encontraban bastante avanzados, por lo que la señalización del estado del proceso de erosión se vio limitada a solo las categorías **procesos activos** e **inactivos** de la metodología empleada; tal solución fue empleada por Ferrer (1977), al toparse con la misma situación en la clasificación de estados de erosión empleada en su estudio geomorfológico; La distinción de estas dos categorías, se planteó en función del criterio de usar la cobertura vegetal densa o parcialmente densa (bosques) como indicador de áreas estables o estabilizadas, en contraposición de aquellas áreas descubiertas de vegetación que en conjunción a la forma presentada (cárcava, surcos, entre otros) señalaran los procesos activos.

En cuanto a la clase reactivada, esta pudo ser referenciada para 2010, gracias al estudio entre las áreas existentes con procesos activos que habían pasado a condición de inactivos en 1976 y su retorno a estado activo mostradas por la imagen de 2010.

En el caso de la determinación de los procesos de erosión para el año 1952, se usaron las clases **bosques, depósitos con sedimentos, pastos, elementos culturales, erosión activa y sin información**. Luego los rasgos observables en la ortofoto fueron señalados siguiendo la clasificación anterior, con la inclusión de la clase **reforestación** (Tabla 20), al denotar la ocupación del suelo para uso residencial principalmente, caso contrario a lo mostrado en la fotografía de 1952, donde el uso del suelo era en su mayoría empleado en el uso de parcelas con gramíneas y algunas construcciones de índole rural.

Tabla 20. Clases desarrolladas para A-34, ortofoto 0102121 e imagen satelital SPOT.

Clase	Descripción	Color
Bosques	Vegetación arbórea densa y parcialmente densa, se muestra en la fotografía con una textura bastante corrugada y de coloración oscura y en la imagen satelital de coloración verde.	Verde
Depósitos de sedimentos	Desprovista de vegetación, se halla en el fondo del valle mostrando un área de deposición de sedimentos. Se observa en la fotografía en coloraciones claras y en la imagen satelital de coloración roja.	Naranja
Pastos	Muestra poca o nula vegetación arbórea, está cubierta por gramíneas pudiendo estar asociada a alguna vivienda de medio rural. Se observa en la fotografía con textura lisa y poco corrugada y en la imagen satelital verde claro, gris o color rosáceo.	Amarillo
Erosión Activa	Señala los procesos activos de erosión, carece de vegetación de algún tipo, se muestra en coloraciones claras en la fotografía aérea y en la imagen satelital en color rojo.	Rojo
Elementos Culturales	Viviendas, carreteras y todo tipo de infraestructura hecha por el hombre. Denota patrón de formas definibles.	Cian
Reforestación	Posible reforestación por parte del MAC, muestra patrón homogéneo de puntos oscuros sobre fondo claro.	Violeta
Sin información	La fotografía no abarca área en la cuenca.	Negro

Análisis inicial (1952-1976-2010)

Un primer análisis basado en la frecuencia presentada por las clases señaladas, permitió observar que el área afectada por los procesos activos de erosión oscilaba en 96,06 ha para el año 1952, luego en 1976 (cuatro años después de la implementación de las medidas técnicas por parte del MAC y demás organismos involucrados), el área que mostraba tal problemática se había reducido a 61,57 ha, denotando una recuperación de 34 ha aproximadamente; el estudio de los procesos de erosión en 2010 arrojó como resultado 56,68 ha en estado activo de procesos de erosión, lo que inicialmente permite concluir que la recuperación de las áreas afectadas se logró significativamente a comienzos de los setenta, lográndose muy poco avance en los años siguientes.

En cuanto a los elementos culturales desarrollados por las acciones humanas en el área estudiada, la presencia de estos era de 0,11 ha en 1952 denotando un carácter eminentemente rural en los mismos, para mostrar un ligero aumento de 5,74 ha en 1976, posibilitado gracias a los procesos de urbanización que ya eran notables para la época, proceso que se mantuvo hasta alcanzar la cantidad de 144,73 ha en 2010, evidentemente esto significó el cambio de uso del suelo de pastos y bosques a elementos culturales.

Como era de suponer, la clase “bosques” sufrió reducción al pasar de 349 ha en 1952 a 287 ha en 1976, sin embargo en 2010, los bosques alcanzaron 387 ha, como consecuencia principalmente por la aplicación de la medida de prohibición y restricción de toda actividad humana en las áreas aledañas a las zonas que denotaban los procesos de erosión y a la reforestación desarrollada por el MAC

Interesante señalar que el área de 9,98 ha de fondo de valle que manifestaban ya la recepción de sedimentos provenientes de los procesos ocurridos tanto en ladera como en cauce en el año 1952, aumentó considerablemente al pasar de esta cifra a la cantidad de 37,33 ha en 1976 y a 54,11 ha en 2010, transformando un fondo de valle con vegetación boscosa a un fondo neto de sedimentos, esto evidencia que el alcance de las medidas desarrolladas no fueron suficientes para frenar un fenómeno que aún sigue estando presente en nuestros días.(Tablas 21,22,23 y Anexos 1,2 y 3).

Tabla 21. Clases 1952.

Clase	Área (ha)
Erosión activa	96,06
Bosque	349,71
Elementos culturales	0,12
Depósitos de sedimentos	9,99
Pastos	202,92
Sin información	25,96

Tabla 22. Clases 1976.

Clase	Área (ha)
Erosión activa	61,57
Bosque	287,18
Elementos culturales	5,75
Depósitos de sedimentos	37,33
Pastos	233,45
Reforestación	61,14

Tabla 23. Clases 2010.

Clase	Área (ha)
Erosión activa	56,69
Bosque	387,26
Elementos culturales	144,73
Depósitos de sedimentos	54,11
Pastos	59,17

Procesos activos 1952-1976

Los procesos de erosión en condición activa habían provocado para 1976, la remoción de 22,49 ha de vegetación boscosa (áreas inmediatas a las cárcavas existentes), manteniendo 34,82 ha de los procesos de erosión activo presentadas en 1952; áreas como parcelas, no fueron casi afectadas; resulta perentorio señalar que la falta de un área sin información en la fotografía de 1952, puede hacer aumentar las dimensiones de las áreas encontradas, aunque no significativamente pues esta clase sólo ocupa 3,56 ha (Tabla 24 y Anexo 4).

Tabla 24. Resultado intersección Procesos activos 1976 vs clases 1952.

Clase	Área (ha)
Erosión activa	34,82
Bosque	22,50
Depósitos de sedimentos	0,02
Pastos	0,67
Sin información	3,57

Depósitos de sedimentos 1952-1976

El resultado de la intersección de la clase Depósitos de sedimentos con la clases existentes para 1952, permitió concluir que esta área aumentó a causa de la pérdida de 17,76 ha de vegetación boscosa y de 11,30 ha de la clase denominada Pastos tanto por los procesos acaecidos tanto en vertiente como aquellos generados por la socavación horizontal (Tabla 25 y Anexo 5).

Tabla 25. Resultado intersección fondo de valle con sedimentos 1976 vs clases 1952.

Clase	Área (ha)
Bosque	17,76
Depósitos de sedimentos	8,27
Pastos	11,30

Situación de los bosques 1952-1976

En 1976, aún se mantenían 202,74 ha de las existentes en 1952, ocurriendo sustitución de estos por los procesos de erosión activa (22,46 ha), introducción de Elementos culturales (2,16 ha), Depósitos con sedimentos (17,76 ha), siendo muy significativo, el cambio de uso del suelo a Pastos (73,76 ha) (Tabla 26 y Anexo 6).

Tabla 26. Resultado intersección bosques 1952 vs clases 1976.

Clase	Área (ha)
Erosión activa	22,47
Bosques	202,75
Elementos culturales	2,16
Depósitos con sedimentos	17,72
Pastos	73,63
Sin información	33,22

Procesos activos 1976-2010

Los procesos de erosión activa seguían en 2010 estando presentes en 31,08 ha de las señaladas por esta clase en 1976, afectando a 9,21 ha de bosque existente e igualmente a 10,08 ha de Pastos, 6,44 ha que fueron reforestadas en 1976 no alcanzaron su cometido, convirtiendo dicha área a un área con manifestaciones de erosión reactivada (Tabla 27, Figura 39 y Anexo 7).

Tabla 27. Resultado intersección procesos activos 2010 vs clases 1976.

Clase	Área (ha)
Erosión activa	31,48
Bosque	9,21
Elementos culturales	0,03
Depósitos de sedimentos	0,28
Pastos	10,08
Reforestación	6,44



Figura 39. Canal de la cárcava Los Pinos en la micro-cuenca “La Machiri”.

Situación de los bosques 1976-2010

El estudio arrojó para el periodo señalado que 9,21 ha de bosques existentes en 1976, pasaron a convertirse en áreas con problemas de erosión, 208,98 ha se mantuvieron siendo bosques y 53,98 ha fueron deforestados para convertirse en parcelas o elementos culturales (Tabla 28 y anexo 8); 54,79 ha reforestadas actualmente son áreas boscosas, señalando de este modo una posible estimación del logro de aplicación de esta medida por parte de los organismos institucionales en el los primeros años de la década de los 70 (Tabla 29 y Anexo 9).

Tabla 28. Resultado intersección bosques 1976 vs clases 2010.

Clase	Área (ha)
Erosión activa	9,21
Bosque	208,98
Elementos culturales	43,97
Depósitos de sedimentos	15,41
Pastos	10,02

Tabla 29. Evolución de las áreas reforestadas.

Clase	Área (ha)
Erosión activa	6,44
Bosque	54,79
Depósitos de sedimentos	0,07

Depósitos de sedimentos 1976-2010

El análisis permitió concluir que el fenómeno de presencia y expansión de los procesos de erosión siguen estando activos; para el periodo comprendido 1976-2010, destaca principalmente la pérdida de 15,66 ha de zonas boscosas (Tabla 30, Figura 40 y Anexo 10).

Tabla 30. Resultado intersección fondo de valle con sedimentos 2010 vs clases 1976.

Clase	Área (ha)
Erosión activa	1,25
Bosques	15,41
Elementos culturales	0,04
Depósitos de sedimentos	35,42
Pastos	1,19
Reforestación	0,07



Figura 40. Fondo de valle con sedimentos en la micro-cuenca torrencial La Machirí.

10.6. Tipos de proceso de erosión

Tipos de erosión 1952

Basados en las limitaciones de la fotografía 804 de la misión A-34, fundamentalmente por la baja resolución espacial de esta, solo se pudo señalar dos

tipos de erosión existente: la erosión concentrada por cárcava con 65,71 ha y la erosión difusa con 30,34 ha; resulta probable que los procesos señalados como de tipo de erosión difusa pudieron ser de otro tipo de erosión, probablemente movimientos de masa. (Tabla 31 y Anexo 11).

Tabla 31. Tipos de erosión encontrados en el área para 1952.

Tipo de proceso de erosión	Area (ha)
cárcava	65,72
difusa	30,34

Tipos de erosión 1976.

La aplicación de la clasificación de los tipos de procesos de erosión existentes en el área de estudio, generó como resultado la presencia casi absoluta de los procesos de tipo concentrado denominados cárcavas (56,81 ha); no se pudo determinar el tipo surco de los procesos concentrados, al no ser observables en la escala 1:10.000 empleada, sin embargo en una escala mayor estos serían divisibles.

Seguidamente a cárcavas, los procesos de erosión difusa ocuparon el segundo lugar en cuanto a extensión se refiere, alcanzando una extensión de 3,45 ha.

Sólo se pudo determinar un área por movimientos de masa de tipo deslizamiento, manifestado en un área de 0,24 ha y se incluyó en el mapa dos áreas sometidas a socavación horizontal propia de los procesos de erosión en cauce, las cuales suman entre ambas 1 ha aproximadamente. (Tabla 32 y Anexo 12).

Tabla 32. Tipos de erosión encontrados en el área para 1976.

Tipo de proceso de erosión	Área (ha)
cárcava	56,82
difusa	3,45
por mov. De masa	0,25
socavación horizontal	1,05

Tipos de erosión 2010

El estudio aplicado sobre la imagen satelital SPOT-5 y constatado por medio de la visita a campo, arrojó como resultado la existencia de 44,87 ha con presencia de erosión concentrada de tipo cárcava, 9,10 ha de tipo difusa, 0,73 por movimientos de masa y aproximadamente 2 ha sometidas a procesos propios de cauce como lo es la socavación horizontal cuando aumentan los caudales en eventos lluviosos (Tabla 33, Figura 41 y Anexo 13).

Tabla 33. Tipos de erosión encontrados en el área para 2010.

Tipo de proceso de erosión	Área (ha)
cárcava	44,88
difusa	9,10
por mov de masa	0,74
socavación horizontal	2,71



Figura 41. Socavación horizontal inducida por los cauces tributarios y principal de la micro-cuenca torrencial la Machirí.

10.7. Grado de los procesos de erosión

La interpretación visual arrojada utilizando el método SARCCUS para la determinación de los grados de erosión existente tanto para erosión difusa como

para cárcavas (Tablas 34 y 35), significó en primer lugar, la imposibilidad de poder definir la categoría “L1: No Aparente” en los años 1952, 1976 y 2010, pues no se presentaron signos visibles de erosión en las fotografías aéreas o la imagen satelital que se pudieran determinar.

Los grados determinados para el año 1952, dieron como resultado la preponderancia del grado “L5: Muy Severa” en las cárcavas con una extensión de 65,15 ha, seguido por la erosión difusa en condición “L3: Moderada” con 29,19 ha (Tabla 34 y Anexo 14).

Tabla 34. Grado de erosión para los procesos de erosión en 1952.

Grado	AREA (ha)
cárcava,L4:Severa	0,57
cárcava,L5:Muy Severa	65,15
difusa,L2: Leve	0,66
difusa,L3:Moderada	29,20
difusa,L5:Muy Severa	0,49

En cuanto al grado de los procesos de erosión en 1976, nuevamente el grado “L5: Muy Severa” en las cárcavas con una extensión de 56,36 ha se situó como el resultado mayoritario, seguido por la erosión difusa “L2: Leve” con apenas 2,15 ha; la reducción en todos los grados de los procesos de erosión existente se produjo principalmente por la aplicación de los procesos de reforestación en el primer lustro de la década de los setenta (Tabla 35 y Anexo 15).

Tabla 35. Grado de erosión para los procesos de erosión en 1976.

Grado	Área (ha)
cárcava,L4:Severa	0,46
cárcava,L5:Muy Severa	56,36
difusa,L2: Leve	2,16
difusa,L3:Moderada	0,76
difusa,L4: Severa	0,53

Finalmente en 2010, los procesos en cárcavas en grado “L5: Muy Severa”, disminuyeron hasta situarse en un área de 39,99 ha; los procesos en cárcavas en grado “L2: Leve” ocuparon 4,69 ha. Si bien es cierto que los procesos de erosión en general se han reducido a lo largo de 50 años, los procesos de erosión difusa en diversos grados de presentación han seguido estando presente, pues aún hay zonas que muestran la pérdida de vegetación sin presentar problemas más agudos como la erosión de tipo concentrada o la ocasionada por movimientos de masa (Tabla 36 y Anexo 16).

Tabla 36. Grado de erosión para los procesos de erosión en 2010.

Grado	Área (ha)
cárcava,L2: Leve	4,69
cárcava,L3: Moderada	0,19
cárcava,L5: Muy Severa	39,99
difusa,L2: Leve	6,96
difusa,L3: Moderada	0,98
difusa,L4: Severa	1,16

10.8. Origen de los procesos de erosión

La determinación del origen de los procesos de erosión en la micro-cuenca torrencial “La Machirí”, ha sido muy imprecisa en cuanto a año se refiere, dado a que este tipo de fenómenos suele notarse después de haberse iniciado y cuando muestran rasgos diferenciales con aquellas áreas que no han denotado algún cambio evidente; entre los trabajos que sitúan el origen del problema en la década de los años 20, 30 ó 40 están MAC (1971) en Finol, (1972), Bello y Guerra (1975), Montoya (1976) y Romero (1977) por citar algunos.

Debe señalarse, que la Misión de Conservación de Suelos y Aguas enviada por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (a petición del Ministro de Agricultura Diógenes Escalante en octubre de 1940), la cual estuvo en el Edo.

Táchira en el mes de enero de 1942, no realizó en su informe mención alguna sobre el problema de erosión de La Machirí, y por el contrario se refirió al estado de la erosión para el área de la “Hoya de San Cristóbal” (área total de la cuenca del Río Tórbes) situada en un estado moderado (Bennett et al., 1942).

Dentro de este orden de ideas, resulta pertinente asumir como periodo más confiable de origen, la década de los años 20, pues involucra la información recogida por la Corporación de Los Andes, una de las instituciones que más ha trabajado en el tema; Corpoandes (1972b) señalaba que el problema de la erosión e inmediatas consecuencias, fueron el resultado de los procesos de deforestación y sustitución del bosque por gramíneas, flores y hortalizas; con añadidura del libre pastoreo permitido en las laderas, que como lo aseguró Bello y Guerra (1975) en sus observaciones, se intensificó posteriormente y se extendió a zonas cada vez más abruptas, constituyéndose de ese modo, en labores agrícolas incontroladas, realizadas por los propietarios y usuarios del campo, ignorantes de haber estado construyendo su propia ruina y la de sus vecinos (Romero, 1977).

En resumidas cuentas, la mala interpretación del término económico “Máximo Beneficio” empleado por los propietarios y usuarios, que se podía obtener de la Machirí por las prácticas agrícolas y pecuarias originó la ruptura del equilibrio natural, cuando se usó la tierra eliminando la vegetación, soporte fundamental del equilibrio ecológico (Hopf, 1972).

El área que desde la década de los 70, ha mostrado la bastedad de los procesos de erosión concentrada, estaba cubierta de frondosos árboles con alturas de más de 40 m., donde las plantaciones de café, frutales y caña de azúcar daban abundantes

cosechas y donde “La Machirí” con sus aguas cristalinas albergaba variados ejemplares de fauna ictiológica (Corpoandes, 1972b).

Testigo del proceso de cambio en la micro-cuenca, fue Don Eufracio Camargo quien arribó en 1943 aproximadamente y era dueño de la hacienda “Santa Cruz” de 350 ha. (Situada en la base de la cárcava de Los Pinos), narraba que dicha hacienda producía 300 cargas (Unidad de medida de algunos productos forestales, como leña, frutos, entre otros, empleado por los campesinos) en los años 1943 a 1945 y por el desmejoramiento de la zona pasó a sólo poder generar 55 cargas, 25 años después (Corpoandes, 1972b).

10.9. Medidas y experiencias desarrolladas

Luego de la dictadura del General Juan Vicente Gómez (período comprendido entre 1908 a 1935), en pleno periodo de transición hacia la democracia (1935 a 1941) “El Dr. Amenodoro Rángel desde el Ministerio de Agricultura y Cría bajo el gobierno de Eleazar López Contreras, inició los estudios de la zona y sugirió la expropiación de los terrenos como medida salvadora” (Romero, 1977).

El 20 de mayo de 1968, Ranulfo Peñaloza (Perito Forestal) dio la voz de alerta desde las columnas del diario local VANGUARDIA bajo el título de “*Las Cárcavas de La Machirí. Un problema conservacionista de todos*”, escrito que se generó a partir de las observaciones realizadas por Peñaloza en una visita de campo con estudiantes integrantes del centro de ciencias del Liceo Simón Bolívar; pocos días después Francisco Romero Lobo destacó la importancia de la referida publicación en el mismo diario VANGUARDIA bajo el título “*Las Cárcavas de la Machirí*” (Romero, 1977).

En 1970, TRANARG C.A. realizó un mapa titulado “Análisis de la cuenca quebrada La Machirí” a escala 1:12.000, determinando en el mismo a nivel planimétrico las cárcavas y demás procesos de erosión (un año después elaboró 4 cartas a escala 1:2.500 abarcando el área de las cárcavas, el cual constituyó buena parte de la base para el desarrollo de la presente investigación).

Ya en 1972, año en el que aparecen varias publicaciones desarrolladas por CORPOANDES, se destacó la declaración del Ing. Agro. Antonio López Mendivelso en una de ellas, quien como director de la Región N° 2 del Ministerio de Agricultura y Cría, señalaba que “*El problema de La Machirí ya tenía un voluminoso expediente de papel y buenas intenciones*” y recordaba que en los años 1952, 1954, 1957 y 1962, se habían levantado informes relacionados con el problema, todos realizados por funcionarios dependientes de la Dirección de Recursos Naturales del Ministerio de agricultura y Cría, trabajos que fueron presentados en convenciones Nacionales Forestales y Agropecuarias, foros públicos, conferencias y Charlas (Corpoandes, 1972b).

Paralelamente al trabajo presentado por CORPOANDES en 1972, Herman Finol [Ing. Forestal, profesor de silvicultura y director del Instituto de Silvicultura en la Fac. de Ciencias Forestales y Ambientales (FCFA) de La Universidad de Los Andes-Mérida] y Josef Hopf (Ing. Forestal del Servicio Federal de Austria para la Corrección de Torrentes, contratado por CORPOANDES), trabajando mancomunadamente y presentando trabajos por separado desarrollaron sus informes técnicos del área, ambos bajo el auspicio de la FCFA de la ULA y CORPOANDES quienes contaron además con el apoyo del Instituto Agrario Nacional.

El trabajo asociativo consistió inicialmente en una excursión a la micro-cuenca, de la cual se desprendieron buena parte de las conclusiones presentadas; sus informes técnicos contaron con la colaboración del Ing. Forestal Ramiro Sánchez, del programa Grita-Tórbes (CORPOANDES), del Sr. Oswald Schweiggel, asistente técnico de J. Hopf. (Finol, 1972), el Geólogo Armando Useche, adscrito al Ministerio de Minas e Hidrocarburos y del MAC [(institución encargada de realizar el mapa base de la cuenca, el levantamiento catastral, las encuestas y avalúos a los pobladores (Hopf, 1972)]. Los trabajos desarrollados por estos expertos, han constituido material de referencia obligatoria en los trabajos que se desarrollaron tiempo después, ejemplo de ello: MAC (1974), Bello y Guerra (1975) y Uzcátegui (1975) y de trabajos más recientes, como el actualmente presentado.

Previamente a su visita a la micro-cuenca torrencial, Hopf estudió detenidamente en Austria, los planos aerofotogramétricos, a escala 1:2.500 de la cuenca, de manera que al viajar a Venezuela para iniciar el estudio, ya tenía un conocimiento preciso de la topografía del lugar y la ubicación de las zonas críticas. Una vez en Venezuela, hizo tres viajes de reconocimiento a la zona, a fin de tomar contacto directo con los pobladores y verificar en el sitio, lo observado en los planos (Hopf, 1972).

Hopf en su informe destacó el diseño de las medidas socio-económicas, biológicas y técnicas, señalando en esta última, la necesidad de construcción de 174 presas y la construcción de un cable-grúa para el transporte de los materiales. Todo el presupuesto estimado para el proyecto ascendía en 1972, a la cantidad de Bs. 44.944.100,00; del cual un 16% representaría la ejecución de los trabajos socio-económicos y biológicos que se requerían de forma inicial y el 84% restante sería aplicado en forma escalonada, de acuerdo a cada etapa del proyecto en la medida

en que fueran haciéndose necesarias las construcciones de tipo técnico según el siguiente orden de prioridades: *El Araque*, *El Medio*, *El Setenta*, *La Cachicama* y *El Toro*; en cuanto a la micro-cuenca *La Osa*, por presentar al momento del estudio una relación muy baja entre tierras dedicadas a la agricultura y el porcentaje de tierras erosionadas, optó por sugerir la espera de reacción favorable del área al simple hecho de eliminación de la actividad humana (Hopf, 1972).

De modo similar Finol (1972), bajo el título “*En la micro-cuenca La Machirí el hombre perdió la batalla*” explicaba los motivos que habían llevado al estado del proceso de erosión y las posibilidades de recuperación, todo bajo un análisis de conjunto representado por las condiciones ambientales reinantes y la intervención de estos.

Finol (1972), acotó que la recuperación de La Machirí era posible lograrla en relativo corto plazo mediante la ejecución de costosas obras de ingeniería (basado en el informe técnico desarrollado por Hopf), con los que se trataría de restablecer el lecho normal de las cárcavas en plena evolución, o en un plazo más largo de ± 20 años, si se dejaba en manos de la naturaleza, bajo resguardo y protección y a un costo muchas veces menor, que probablemente no hubiera excedido los 8 millones de Bolívares; finalmente dicho autor sugirió la creación de un decreto especial, que fuese emanado por las autoridades gubernamentales que prohibiera terminantemente cualquier actividad humana en todas las regiones en condiciones semejantes a “*La Machirí*”.

Ambos informes detallaron como novedad, la extrapolación de datos de pérdidas de aguas y suelo bajo diferentes coberturas vegetales y con diversas prácticas de conservación en Chinchiná-Colombia, durante el período comprendido

entre 1949 a 1953, de dicha forma corroboraron metódicamente que la deforestación fue el causante del desequilibrio del ciclo hidrológico y consecuentemente de la activación de los procesos de erosión. Tanto Finol (1972) como Hopf (1972), concordaron que era preciso el establecimiento de dos zonas experimentales en las cárcavas: *El Setenta* y *El Araque* en la micro-cuenca *Los Pinos*, planteamiento que posteriormente sería retomada por Bello y Guerra (1975) en su trabajo.

En 1974, la Oficina de Manejo Hidrológico Forestal de cuencas del MAC, realizó un análisis de la cuenca para determinar las prioridades de tratamiento, la cual resultó coincidir con el orden propuesto por Hopf dos años antes, partiendo de ello, presentaron tipos de tratamiento conservacionista, sus formas de ejecución y los costos que implicaban su realización; como complemento incluyeron un esquema de investigación e instrumentación que les permitiría obtener resultados factibles y extrapolables a cuencas vecinas y en general a cualquier cuenca montañosa de los andes venezolanos (MAC, 1974).

Tabla 37. Cuadro resumen de tenencia de la tierra presente para 1974.

Rango de tamaño Ha	N° de unidades explotadas (fincas)	Porcentaje de propiedades	Área (Ha)	Porcentaje de área que representa.
Hasta 1	30	34,48	15.425	2,15
1-5	33	37,93	75.400	10,49
5-10	9	10,34	66.175	9,21
10-20	7	8,04	93.750	13,05
20-80	6	6,89	216.000	30,05
7-80	2	2,29	252.250	33,10

El 2,29% de los propietarios ocupaban el 35,10% del área, es decir las fincas mayores de 80 Has (que eran 2) estaban en manos de 2 propietarios; mientras que los propietarios de fincas menores de 1 Ha Representaban el 34,48% del total de propietarios, ocupando un área del 2,15% del total (718.6 ha). (Fuente: MAC, 1974).

Un año después, Uzcátegui, en su trabajo realizado bajo la petición y el apoyo de la Oficina de Planificación y Manejo de Cuencas (OFIPLAMC) del Ministerio de Agricultura y Cría (MAC), señalaba que la medida socio económica planteada por Hopf (1972) y Finol (1972) había sido puesta en práctica, asegurando que la zona se hallaba totalmente libre de toda actividad agrícola y pecuaria, lo que trajo como consecuencia una rápida recuperación natural a partir de la presencia de especies arbustivas en la zona (Uzcátegui, 1975).

Efectivamente en 1975, se llevaron a cabo en las cabeceras de las cárcavas el enfajinado con pasto Kikuyo, la construcción de diques de bambú en las cárcavas propiamente dichas, la proyección de construcción de gaviones de poca altura y canales de desviación a fin de reducir la esorrentía en el área de la cárcava “*Los Pinos*” a partir de dos obras: un canal de 80 m. y otro de 280 m. de longitud destinados a captar el agua de 5, 29 ha. (Uzcátegui, 1975).

Adicionalmente, Uzcátegui sugirió la rectificación de los diques de bambú, pues observó falta de inclinación en el parámetro superior, a fin de que se evitase la socavación en sus bases y el inicio de la construcción del resto de diques, pues los continuos deslizamientos cambiaban progresivamente el perfil longitudinal del terreno. Recomendaba también la necesidad de instrumentar medidas presupuestarias que evitasen la paralización temporal de las obras, pues ese tipo de situación traería descontrol en el área de tratamiento; la planificación tomando en cuenta los factores estacionales (planteamiento retomado por Montoya en 1976), un minucioso análisis de costo, actividades extensionistas de divulgación mediante charlas, conferencias y el aligeramiento de la instalación del cable-grúa propuesto por Finol y Hopf tres años antes. También realizó una selección de sitios, levantamientos, diseño y cálculo de obras de control de torrentes que no fueron

aprobadas por OFIPLAMC, puesto que existieron razones negativas entre las que destacaba la alta probabilidad de ocasionar daños a los cauces de quebradas a donde serían remitidos los caudales canalizados por estas obras.

Paralelamente, Bello y Guerra (1975), presentaron su *“Informe de Pasantías”* el cual tuvo por finalidad conocer los problemas que afectaban la zona en cuanto al proceso de erosión y las labores que se estaban llevando a cabo tendientes a poner coto al problema. Constataron la instalación de un puesto de la Guardia Nacional denominado *“Puesto de la Machiri”* (creado el 03 de octubre de 1973 por el decreto 1.440 del Ejecutivo Nacional) para el aseguramiento de la vigilancia, reforestación, peinado de taludes, construcción de terrazas, apertura de caminos secundarios, planificación de un sistema de cables aéreos, establecimiento de parcelas y franjas de regeneración natural. Actualmente el puesto de la Guardia Nacional se halla en funcionamiento, en el sitio conocido como *“Helechales”*, municipio Cárdenas, muy cerca del área de la cuenca (Figura 42).



Figura 42. Instalaciones del Puesto de la Machirí y misión del mismo.

Bello y Guerra (1975), también explicaron que el éxito de las medidas socio-económicas implicaron la adquisición de las propiedades existentes (700 ha. Aprox.) y el inmediato traspaso a propiedad del estado con levantamiento de cercas, con el que delimitaron el derecho de vías y el impedimento de paso a animales y personas en donde se estaban aplicando los métodos conservacionistas.

Finalmente en el año 1975 destacó la elaboración del mapa “Aspectos Geomorfológicos” para la cuenca por parte de Montañez, J.; Contreras, G. y Ramírez, O. tomando como fuente el trabajo de Ferrer.

Más adelante, Montoya (1976), en su informe “*Aspectos técnicos generales a realizar dentro de las actividades en el proyecto La Machirí*” en complemento a los anteriores trabajos ya esbozados, indicaba las actividades que debían realizarse tanto en la época de lluvias (supervisiones a las plantaciones, tratamiento de taludes y diseño de plan de prevención contra incendios), como en época de sequía (plantaciones, construcciones para el control de torrentes, estabilización de laderas entre otras).

También describió el “*Anteproyecto del Vivero*”, que fue implementado en el área de la micro-cuenca, diseñado para producir 50.000 plantas anuales de buena calidad, a fin de responder con la necesidad de una fuente de producción de especies que garantizaría un suministro constante para realizar ensayos en materia vegetativa. Explicó que el vivero, fue situado en las proximidades de la oficina de campo del proyecto “*La Machirí*” inmediatamente debajo hacia la margen derecha de la cárcava de Los Pinos, en respuesta a la necesidad de suplantar el material vegetativo proveniente del Vivero Forestal MAC-Rubio, el cual no llegaba en óptimas condiciones para ser plantado.

Dentro de este orden de ideas, Montoya pudo constatar que el medio de transporte que aún existía para llevar los materiales a la parte alta de la cuenca era el mular, método de transporte menos eficiente que el sistema de cable-grúa propuesto por Finol y Hopf en 1972 y que hubiere generado resultados más satisfactorios de las medidas técnicas llevadas a cabo, de haberse implementado.

Todas las obras desarrolladas entre 1972 y 1976, fueron abandonadas, quedando solo unos montones de piedra en los sitios; se llegó incluso a construir uno de los diques con más de 20 m. de altura, pero bastaron dos o tres crecidas y esos trabajos quedaron sepultados por los sedimentos (Ramírez, O. 2011. junio) [Entrevista realizada por los estudiantes de Comunicación Social de La Universidad de Los Andes-Táchira Francisco y Hernández Angelis Cavallini] igual suerte corrió la oficina de campo del proyecto “*La Machirí*” y su Vivero anexo (Vidal, 2009).

Debido a la creación del Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales (M.A.R.N.) en Abril de 1977, el proceso de restauración de la Machirí, lamentablemente se vio obstaculizado, ya que las políticas de trabajo de esta nueva instancia no eran las mismas del MAC y no estaban bien enfocadas en cuanto a la importancia del tema. (Peñaloza, R. 2011, junio). [Entrevista realizada por los estudiantes de Comunicación Social de La Universidad de Los Andes-Táchira Francisco y Hernández Angelis Cavallini]. De este modo se puede asegurar que el único ente que realizó intentos de aplacar la situación de los procesos de erosión, fue el Ministerio de Agricultura y Cría (MAC) (Contreras, G. 2011, junio) [Entrevista realizada por los estudiantes de Comunicación Social de La Universidad de Los Andes-Táchira Francisco y Hernández Angelis Cavallini].

En la década de los 80, se realizaron nuevamente trabajos de investigación en el área, como el de González (1982), que presentó el “*Diagnostico físico conservacionista de la cuenca del Río Tórbes*” en el cual se aplicaron 2 metodologías: La fórmula descriptiva modificada para el análisis cualitativo de cuencas torrenciales de Filiberto López Cadenas del Llano y la Identificación de cuencas prioritarias a través de la aplicación de los 34 parámetros. De la aplicación de estas metodologías y la comparación entre las mismas, se desprendió que la Machirí resultó ser la primera prioridad de tratamiento en función de los problemas observados (Cuencas estudiadas: *Machirí, Tamboral, Zumbador, Ficala, Chucurí y la Salomona*).

Ferrer y Cabello (1982), observaron que durante el período 1979 a 1981, en el sistema de cárcavas de La Machirí, se presentaba aún, una gran variación en las condiciones de estabilidad (aceleración de los procesos de incisión y transporte de material), provocada posiblemente por la intensidad de las precipitaciones (duración y frecuencia).

Posteriormente, Contreras y Montañez (1989), desarrollaron el informe “*Algunos aspectos físicos de la sub-cuenca Quebrada La Machirí*” presentado por la División de información e investigación del Ambiente del M.A.R.N.R., en él desarrolló una descripción física cuyo énfasis fue describir desde el punto de vista pedológico los tipos de suelos (clasificación taxonómica) presentes a través de varios perfiles, así como también el tipo de formación geológica que presentaron los materiales parentales.

A final de los años 90, como resultado de la pérdida de más de 100 ha. de terreno por deslizamientos en la micro-cuenca “*La Machirí*” durante el período de

lluvias de 1998, Orlando Ramírez Director de la Región 18 Suroeste del M.A.R.N.R. en oficio al Lic. Ignacio Andrade Presidente de la Asamblea Legislativa Regional, dirigió un informe, producto de una inspección realizada por funcionarios adscritos al Servicio Autónomo de Conservación de Suelos y Cuencas Hidrográficas de la región, en el cual hizo referencia a la situación de “*La Machirí*” para ese momento y en donde resaltó la no ejecución a cabalidad por organismo alguno del estado de los proyectos desarrollados en los años 70. A partir de dicha justificación, solicitó la planeación y ejecución de un vuelo Aerofotogramétrico a escala 1:10.000 o en su defecto la generación de Ortofotoplanos, que permitiría realizar un análisis detallado del área, en aras de buscar la declaratoria y delimitación de espacios bajo régimen especial como serían las figuras de “*Reserva Hidrológica*” o “*Áreas de Acciones Especiales*” (paralelamente a la búsqueda de aprobación y financiamiento del plan requerido ante la Asamblea Legislativa Regional, dirigió oficios a la Jefatura del Servicio de Cartografía Nacional)(O. Ramírez. Comunicación Institucional, Oficio 1126, Agosto 11, 1998).

A finales de septiembre del mismo año, la Dirección Sectorial del Servicio Autónomo de Geografía y Cartografía Nacional (SAGECAN), dio respuesta a las comunicaciones enviadas por Orlando Ramírez, en la cual señalaba que se estaban realizando tomas aéreas a escala 1:60.000 del área, con la convicción de crear a partir de ellas ortofotos a escala 1:25.000 en formato digital por el Programa de Inversión para la Transformación del Sector Agrícola (PITSA), utilizables para ser manejados en escala media (A. Moreau. Comunicación Institucional, Oficio 6401, Septiembre 25, 1998).

En octubre, la Dirección Regional del M.A.R.N.R. a partir de la respuesta emanada por SAGECAN dirigió un oficio al Ing. Maclobio Orozco director de DAINCO, en dicha comunicación sugirió la posibilidad de transformar en información a escala 1:10.000 (escala fijada como meta de trabajo) la ortofoto 1:25.000 (O. Ramírez. Comunicación Institucional, Oficio 6401, Octubre 08, 1998).

En junio de 1999, en vista del nulo avance de la propuesta diseñada por la Dirección Regional del M.A.R.N.R., la división de Aguas y Suelos encabezada por Germán Contreras recomendó nuevamente volver a oficiar a SAGECAN, con los cambios que fuesen ameritados (Contreras, G. Comunicación Oficial. Sin código. Junio 08, 1999).

En 2011, luego de una década sin esfuerzos dirigidos a estudiar o solucionar el problema de la erosión en “*La Machiri*”, dado principalmente por la falta de capacidad en maquinaria y recursos económicos del Ministerio del Ambiente (Contreras, G., 2011, junio) [Entrevista realizada por los estudiantes de Comunicación Social de La Universidad de Los Andes-Táchira Francisco y Hernández Angelis Cavallini], no se vislumbra la aplicación de soluciones para revertir tal situación.

Actualmente no se están realizando trabajos en el área de las cárcavas, sin embargo Ramón Arellano, coordinador adjunto a la dirección del Instituto Nacional de Parques (INPARQUES), señaló que en años anteriores se realizó una reforestación con la ayuda de las comunidades vecinas, lo cual contribuyó a rescatar ciertas áreas, sin embargo, el problema de las cárcavas aún persiste y es la falta de presupuesto para ejecutar proyectos de recuperación lo que ha impedido

solucionar el problema (Arellano, R. junio, 2011). [Entrevista realizada por los estudiantes de Comunicación Social de La Universidad de Los Andes-Táchira Francisco y Hernández Angelis Cavallini].

Para finalizar sobre los estudios realizados intrínsecamente en el área, se hace necesario hacer referencia al trabajo “*Erosión y conservación en la cuenca de la quebrada "la Machirí"* desarrollado por Justo Avilan quien con apoyo de la Fundación para la Capacitación e Investigación Aplicada a la Reforma Agraria (CIARA) realizó un intento de comprensión, evaluación del problema y sus consecuencias y enumeró una serie de soluciones, mediante el estudio de dos mapas sobre el estado de las cárcavas para los años 1952 y 1970. Lamentablemente este trabajo no precisa fecha de publicación, por cuanto resulta difícil situarlo cronológicamente, no obstante, el hecho del estudio comparativo entre los mapas y las ideas postuladas, hacen intuir que el mismo fue desarrollado antes de 1972, año en que Hopf, Finol, Corpoandes y el MAC iniciaron el boom de investigaciones y proyectos.

Otra parte de los estudios que hacen alusión al problema de la erosión en la micro-cuenca, están enmarcados dentro de los trabajos referidos a la cuenca del Río Tórbes, u otros estudios que abarcan cuencas vecinas o cercanas a esta; entre estos tenemos algunos como Corpoandes (1972a), Ferrer (1977), Rojas (1977), Ferrer y Cabello (1982) y M.A.R.N.R. (1983) en este último contó con el apoyo de la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) y la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO).

Tabla 38. Algunos trabajos para la cuenca del Río Tórbes.

Año	Publicación
1942	BENNETT, H.; SUBBELL, D.; HULL, W.; CAUDLE, J.; Misión de conservación de suelos. División de Conservación de Suelos de la Dirección Forestal del Ministerio de Agricultura y Cría. Caracas-Venezuela.
1972	CORPOANDES. Recursos de Aguas y Tierras para el Desarrollo de la Sub-Región Grita-Tórbes. N° 5. CIDIAT. Mérida, Venezuela.
1977	FERRER, C. Estudio geomorfológico detallado de la cuenca media-inferior del río Tórbes Estado Táchira. Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales, Universidad de los Andes. Mérida-Venezuela.
1977	ROJAS, D. Determinación del uso y manejo de los suelos en la cuenca alta y media del río Tórbes, Táchira, Venezuela. Universidad de Los Andes, Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales. Mérida-Venezuela.
1981	FERRER, C. y CABELLO, O. Características geomorfológicas de la cuenca del Río Tórbes. Universidad de los Andes. Mérida-Venezuela.
1982	GONZALEZ, A. Diagnóstico Físico Conservacionista de la Cuenca del Río Tórbes. Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales, Universidad de los Andes. Mérida-Venezuela.
1983	MINISTERIO DEL AMBIENTE Y DE LOS RECURSOS NATURALES RENOVABLES. 1983. Sistemas Ambientales Venezolanos. Proyecto Ven/79/001. Región Los Andes. Edo. Táchira. Serie VII Estudios Regionales. Volumen I.

Tabla 39. Algunos trabajos en el área de la micro-cuenca “La Machirí”.

Año	Publicación
1970	TRANARG. Análisis de la cuenca “Quebrada La Machirí”. Escala 1:12.000 (mapa).
1971	MAC Fenómeno erosivo micro-cuenca La Machirí. Un problema conservacionista que nos preocupa a todos. Ministerio de Agricultura y Cría Región 2 Recursos Naturales Renovables. Folleto San Cristóbal-1971.
1972	HOPF, J. Proyecto Conservacionista y Corrección de la Cuenca la Machirí, San Cristóbal Edo. Táchira. Corporación de los Andes. Mérida- Venezuela.
1972	FINOL, U. En la micro-cuenca “La Machirí”, el hombre perdió la batalla. Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales, Universidad de Los Andes, Mérida-Venezuela.
1972	CORPOANDES. PROYECTO DE RECUPERACIÓN DE LA CUENCA DE LA QUEBRADA LA MACHIRÍ. REVISTA CORPORACIÓN DE LOS ANDES N°9, ENERO-JUNIO 1972.
1974	MAC PLAN DE MANEJO DE LA CUENCA “LA MACHIRI” EDO. TACHIRA ANALISIS DE LA CUENCA PRIORIDADES DE TRATAMIENTO VOL. 1.Y 2 Mérida- Venezuela.
1975	BELLO, M. y GUERRA, J. Proyecto "La Machirí" (San Cristóbal). Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales, Universidad de Los Andes. Mérida-Venezuela.
1975	MONTAÑEZ, J.; CONTRERAS, G. y RAMIREZ, C. Aspectos geomorfológicos Sub-Cuenca “La Machirí” Escala 1:15.000 (mapa).
1975	UZCATEGUI, F. Canales y Diques en la micro-cuenca Los Pinos-La Machirí (San Cristóbal). Universidad de Los Andes, Facultad de Ciencias Forestales y ambientales. Mérida-Venezuela.
1976	MONTROYA, M. Aspectos técnicos generales a realizarse dentro de las actividades en el proyecto "La Machirí". Facultad de Ciencias Forestales y ambientales, Universidad de Los Andes, Mérida-Venezuela.
1977	Sin autor. INFORME SOBRE LA CUENCA QDA. LA MACHIRÍ.
1989	CONTRERAS G. y MONTAÑEZ, J. 1989. Algunos Aspectos Físicos de la Sub-cuenca Quebrada La Machirí. División Información e Investigación del Ambiente Región N°6 M.A.R.N.R. San Cristóbal-Venezuela. Junio.
19¿?	AVILAN, J. Erosión y conservación en la cuenca de la Quebrada "La Machirí". CIARA, Caracas-Venezuela.*

*publicación que no define año, la misma reposa en la biblioteca de la Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales, Universidad de Los Andes. Mérida-Venezuela.

Conclusiones y Recomendaciones

- La aplicación de las metodologías tanto cualitativas como cuantitativas permitieron determinar el estado, tipo y grado de los procesos de erosión manifestados en el área, mediante la utilización de recursos modernos como los SIG y los SFD.
- La información digital obtenida, aparte de poder ser usada en la consecución de estudios posteriores en aras de información adicional, podrá servir de base para la toma de decisiones futuras tanto en el área como en cuencas circunvecinas que denoten proceso homólogos de erosión.
- Si bien es cierto que la obtención de DEMs es un gran logro de la fotogrametría digital y de los sistemas de información geográfica, queda evidenciado en este trabajo que para lograr excelentes y precisos resultados en los DEMs, hay que sortear muchos problemas de orden tecnológico e impedimentos institucionales que consecuentemente conllevan a la toma de decisiones que generan resultados un tanto insatisfactorios.
- Se pudo comprobar que los procedimientos de edición manual basada en interpretación visual resultaron inevitables de emplear, condición que minimiza los meritos de los procesos automáticos.
- Se sugiere la aplicación de metodologías que ayuden a contribuir en el análisis de los procesos acaecidos y aún existentes en el área a partir de la aplicación de metodologías como las ecuaciones para la estimación de la pérdida de suelo (ejemplo USLE, MUSLE O MUST), la susceptibilidad en la misma (TC Sheng o IRE).
- En cuanto a la estimación de volumen, se encontró diferencias significativas en los dos modelos volumétricos generados; asumiendo que las diferencias

(todas las clases excluyendo aquella que representa el EMCT) son el resultado de la sumatoria de los errores: **distribución espacial de los puntos de control** señalados para el proceso fotogramétrico seguido del error generado a partir del método **de interpolación** aplicado durante el mismo y el error resultante originado por el mismo **comportamiento local de los procesos de erosión** en el área de estudio, cabría preguntarse ¿qué peso poseen cada uno de los errores en la generación de los modelos? tanto por los métodos desarrollados con las experiencias de TRAGNAR C.A. en 1972 y el desarrollado por este trabajo, pues en ambos casos no se conocen a ciencia cierta.

- Se sugiere la definición de nuevos puntos de control en aquellas áreas que carecen de estos, a fin de generar una distribución mejor y con ello obtener mejores resultados del proceso fotogramétrico.
- El análisis sectorizado realizado a través de las áreas, permitió concluir que efectivamente la ausencia de una distribución más eficiente de los puntos de control, generó resultados poco adecuados para la determinación de los volúmenes (estudios 3D) sin embargo para efectos del estudio planimétrico de cálculos de áreas (estudios 2D) fueron aceptables (exceptuando a la fotografía de la misión A-34 la cual no contó con un proceso fotogramétrico adecuado), esta conclusión es fácilmente desprendible de superponer la imagen Satelital Spot-5, la Ortofoto generada con el proceso fotogramétrico y la fotografía georeferenciada de la misión A-34.
- los análisis desarrollados y basados sobre la varianza, pudieran ser tomados en cuenta para mejorar el modelo de elevación digital obtenido mediante

proceso fotogramétrico, a partir de la selección de una ecuación de ajuste de los puntos de control sobre el raster o grid.

- La misión 0102138 no pudo ser utilizado para la generación del DEM dado a que la escala 1.50.000 no permitió diferenciar detalles observables para la definición de puntos de control, ameritados para la aplicación del proceso fotogramétrico, aunado a ello, por la misma razón de escala, el bloque de trabajo necesario para el desarrollo del proceso fotogramétrico implicaría un volumen de información cuatro veces mayor al generado durante el proceso desarrollado sobre las fotografías 0102121, imposible de manejar por los ordenadores corrientes, lo que ocasionaría por consiguiente la imposibilidad de generar DEM alguno; sin embargo no se desestima la probabilidad de realizar el proceso fotogramétrico en el futuro mediante ordenadores personales más potentes que salven la limitación actual y que a su vez serán de utilidad para obtener los productos que permitirán posteriores análisis volumétricos y planimétricos.
- La misión A-34 (escala 1:40.000) utilizada, fue obtenida a través de un escáner corriente, lo que le confirió un resolución oscilante a 100 micrones, condición que imposibilitó mejorar la georeferenciación, lograr una observación de los detalles contenidos y finalmente generar un DEM y ortofoto, que pudiera haber sido útil para el entendimiento de la dinámica de los procesos erosionales presentados en la micro-cuenca torrencial “La Machirí”. Se sugiere realizar nuevamente la solicitud del escaneo a una resolución de 14 micrones al IGVSb, que permita ahondar en el estudio de este caso, y de dicho modo ampliar y mejorar los resultados preliminares tanto del estudio de dicha fotografía como del proceso de erosión en “La Machirí”.

- Pocos estudios han abordado el problema de los procesos de erosión de modo específico, este trabajo buscó llenar los vacíos relacionados con el tema, mediante la aplicación de metodologías como las sugeridas por Corpoandes en 1972 y las aplicadas en África Meridional entre otras, así como también de los avances tecnológicos, principalmente posibilitados por la existencia de software fotogramétricos y los sistemas de información geográfica.
- Las publicaciones elaboradas tanto por el M.A.C, CORPOANDES, M.A.R.N.R y CIARA, por hallarse en formato analógico, en muchos de los casos se hizo difícil de localizar, por cuanto resulta perentorio llevar los mismos a un formato digital (acción a realizar principalmente por la DEA Táchira, donde puedan constituirse en archivos de fácil descarga y obtención y con ello, impedir su deterioro y pérdida.
- Finalmente, resulta perentorio que se realicen evaluaciones periódicas en la parte alta de la cuenca (área que denotó los grandes fenómenos de erosión y que en la década de los 70 fue tratada mediante diversas estrategias por los entes encargados para su recuperación), por las instituciones MPPA y Guardia Nacional, dado a que la población se ha incrementado, lo que ha ocasionado nuevas intervenciones en el área, principalmente por la construcción y ampliación de viviendas y la deforestación para la constitución de nuevos caminos y veredas.

Referencias citadas:

- ALCANTARA, I. 2000. Landslides: ¿deslizamientos o movimientos del terreno? Definición, clasificaciones y terminología. **Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM.** N° 41. México.
- ALVARADO, C. y ENCINALES, J. 2002. Informe Técnico visita de emergencia cabecera municipal de Guayabal de Siquima Cundinamarca. **INGEOMINAS, Subdirección de Amenazas Geoambientales.** Bogotá-Colombia.
- ARISTIZABAL, E. 2008. Características, Dinámica y Causas del Movimiento en Masa del Barrio El Socorro (31 de mayo de 2008) en Medellín. **Revista EIA.** (10) 19-29. Escuela de Ingeniería de Antioquia, Medellín-Colombia.
- AVILAN, J. 19¿?. Erosión y conservación en la cuenca de la Quebrada "La Machirí". **CIARA,** Caracas-Venezuela.
- AYALA, R. 2006. Abanico el Palón: evidencia cosmística del alto grado de vulnerabilidad de la cuenca del río Chama, estado Mérida- Venezuela. **Revista Geográfica Venezolana.** 47 (1) 85-102.
- BADILLA, E.; VAN WESTEN, C. y KINGMA, N. 2003. Evaluación de la amenaza y causas de inundación en la ciudad de Turrialba, Costa Rica. **Revista Geológica de América Central.** (28) 91-108.
- BARRIOS, A. 1997. Erosión y producción de sedimentos en cuencas hidrográficas. **Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales, Universidad de Los Andes.** Mérida-Venezuela.
- BASTIDAS, R. 2007. Nociones de Hidrografía. **Consejo de Publicaciones, Universidad de Los Andes.** Mérida-Venezuela.
- BELLO, M. y GUERRA, J. 1975. Proyecto "La Machirí" (San Cristóbal). **Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales, Universidad de Los Andes.** Mérida-Venezuela.
- BENNETT, H.; SUBBELL, D.; HULL, W.; CAUDLE, J.; 1942. Misión de conservación de suelos. **División de Conservación de Suelos de la Dirección Forestal del Ministerio de Agricultura y Cría.** Caracas-Venezuela.
- BOSQUE, J. 1992. Sistemas de Información Geográfica. **Ediciones Rialp, S.A.** Madrid- España.
- CHUVIECO, E. 2008. Teledetección Ambiental. La observación de La Tierra desde el Espacio. **Ariel Ciencia.** Barcelona-España.

- CONTRERAS, G y MONTAÑEZ, J. 1989. Algunos Aspectos Técnicos de la Sub-Cuenca Quebrada La Machirí. **División de Información e Investigación del Ambiente M.A.R.N.R. Región N° 6**. San Cristóbal 1989.
- Conrad, O. 2003. Description module SAGA: Variogram. Revisado el 3 de junio de 2012.
- Conrad, O. 2010. Description module SAGA: Mínimun distance analysis, Spattial point pattern analysis, Variogram surface. Revisado el 3 de junio de 2012.
- CORPOANDES. 1972a. Recursos de Aguas y Tierras para el Desarrollo de la Sub-Región Grita- Tórbes. N° 5. **CIDIAT**. Mérida, Venezuela.
- CORPOANDES. 1972b. Proyecto de recuperación de la cuenca de la quebrada La Machirí. **Revista Corporación de Los Andes**. N°9, enero-junio 1972.
- DELGADO, F. 2004. Agricultura Sostenible y Mejoramiento de Suelos de Ladera. **Serie Suelos y Clima SC-76**. **CIDIAT**. Mérida, Venezuela.
- DELGADO, F. 2009. Introducción a la Conservación del Suelo en Tierras Altas en Venezuela. Presentado en la asignatura Planificación del Uso de la Tierra. **Universidad de Los Andes, Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales. Centro de Estudios Forestales y Ambientales de Postgrado**. Marzo. Mérida-Venezuela.
- ESCOBAR, G. 2003. Manual de Geología para Ingenieros. (2ª.ed.) **Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales**. Manizales-Colombia.
- ESRI. 2008. ArcGis Desktop Help: Find the volume cointaned in a surface. Revisado el 18 de Julio de 2009.
- FERRER, C. 1977. Estudio geomorfológico detallado de la cuenca media-inferior del río Tórbes Estado Táchira. **Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales, Universidad de los Andes**. Mérida-Venezuela.
- FERRER, C. y CABELLO, O. 1982. Caracterización geomorfológica de la cuenca del Río Tórbes. Estado Táchira, Venezuela. **Revista Geográfica Venezolana**, XXII-XXIII: 43-87.
- FINOL, U. 1972. En la micro-cuenca “La Machirí”, el hombre perdió la batalla. **Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales, Universidad de Los Andes**, Mérida-Venezuela.
- PROYECTO MULTINACIONAL ANDINO: GEOCIENCIAS PARA LAS COMUNIDADES ANDINAS. 2007. Movimientos en Masa en la Región Andina: Una guía para la evaluación de amenazas. **Servicio Nacional de Geología y Minería, Publicación Geológica Multinacional**, No. 4, 432 p.

- GALLARDO, A. 2006. Geoestadística. Revista científica y técnica de ecología y medio ambiente. **Asociación Española de Ecología Terrestre (AEET)**. 15 (3): 48-58
- GONZÁLEZ, A. 1982. Diagnóstico Físico Conservacionista de la Cuenca del Río Tórbes. **Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales, Universidad de los Andes**. Mérida-Venezuela.
- GUEVARA, P. 2000. Sistemas de Conservación y Rehabilitación de Cuencas. **Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico de la Universidad de Carabobo**. Valencia-Venezuela.
- HERNÁNDEZ, L. 2008a. Proyecto fotogramétrico digital. **Universidad Distrital Francisco José de Caldas**. Bogotá-Colombia.
- HERNÁNDEZ, L. 2008b. Procesos de fotogrametría digital. **Universidad Distrital Francisco José de Caldas**. Bogotá-Colombia.
- H e R INDSEER. 2000. Análisis geoestadístico y de exposición solar. Santa Fe de Bogotá- Colombia.
- HOPF, J. 1972. Proyecto Conservacionista y Corrección de la Cuenca la Machirí, San Cristóbal Edo. Táchira. **Corporación de los Andes**. Mérida-Venezuela.
- INGEOMINAS. 2001. Evaluación del Riesgo por Fenómenos de Remoción en Masa. **INGEOMINAS, Subdirección de Amenazas Geoambientales**. Bogotá-Colombia.
- INGEOMINAS. 2002. Clasificación Regional de Amenaza Relativa de Movimientos en Masa en Colombia. **INGEOMINAS, Subdirección de Amenazas Geoambientales**. Bogotá-Colombia.
- JUNIOR, J.; CRUZ, L.; NOGUEIRA, T.; RODRIGUEZ, S. 2008. Monitoramento de processos erosivos em parcelas experimentais no município de uberlândia, mg. **Revista Geográfica Acadêmica**. v.2 n.3 (xii.2008) 5-18
- LARSSON, R. y STRÖMQUIST, L. 1995. Monitoreo del Medio Ambiente con análisis de Imágenes Satelitarias. **Tryckkontakt, Uppsala**. Suecia.
- LOBO, J. y ULRICH, K. 2008. Modelos Digitales De Elevación (DEM) a partir de sistemas satelitales. Una introducción y análisis comparativo en la cordillera de Mérida-Venezuela. **Revista Geográfica Venezolana**. 49 (1) 11-42.
- LÓPEZ, R. 2002. Degradación del Suelo: causas, procesos, evaluación e Investigación. **Serie Suelos y Clima SC-75. CIDIAT**. Mérida, Venezuela.

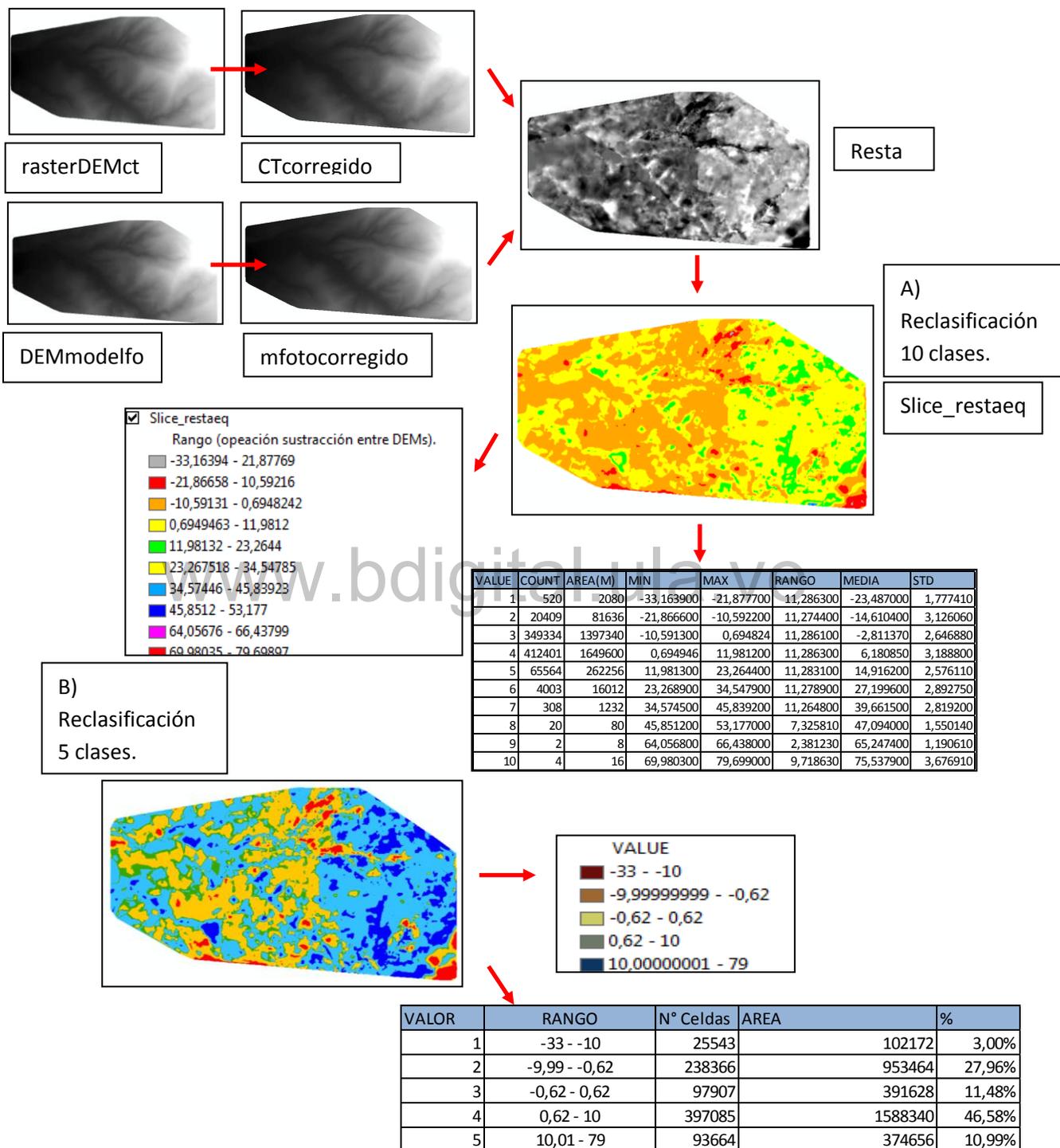
- LABORATORIO DE FOTOGRAMETRÍA Y SENSORES REMOTOS, 2007. Sistemas de Información Geográfica, ejercicio número 04: Escaneo y Georeferenciación. Laboratorio De Fotogrametría y Sensores Remotos. **Universidad de los Andes**. Mérida-Venezuela.
- LUCENA, E. 1988. La pequeña historia de las plantaciones forestales en Los Andes. **Recursos**. 33 (3) 5-6.
- MINISTERIO DE AGRICULTURA Y CRÍA. 1974. Proyecto de manejo de la cuenca “La Machirí” (Edo. Táchira) Análisis de la cuenca prioridades de tratamiento vol. 1. **OFIPLAMC**. Mérida- Venezuela.
- MINISTERIO DEL AMBIENTE Y DE LOS RECURSOS NATURALES RENOVABLES. 1983. Sistemas Ambientales Venezolanos. Proyecto Ven/79/001. Región Los Andes. Edo. Táchira. **Serie VII Estudios Regionales**. Volumen I.
- MARTÍNEZ-CASASNOVAS, J.; RAMOS, M.; RIBES-DASI, M. 2001. Soil erosion caused by extreme rainfall events: mapping and quantification in agricultural plots from very detailed digital elevation models. **Geoderma** 105 (2002) 125–140.
- MARTINEZ-CASASNOVAS, J.; RAMOS, M.; POESEN, J.; 2004. Assessment of sidewall erosion in large gullies using multi-temporal DEMs and logistic regression analysis. **Geomorphology**. 58 (2004) 305–321.
- MONTROYA, J. 1976. Aspectos técnicos generales a realizarse dentro de las actividades en el proyecto "La Machirí". **Facultad de Ciencias Forestales y ambientales, Universidad de Los Andes**, Mérida-Venezuela.
- MOREIRAS, S.; LENZANO, M. y RIVEROS, N. 2008. Inventario de Procesos de Remoción en Masa en el Parque Provincial Aconcagua, provincia de Mendoza –Argentina. **Multequina Latin American Journal of Natural Resources**. Mendoza-Argentina. (17) 129-146.
- MORENO, A. 2008. Sistemas de información geográfica. Manual de Autoaprendizaje con ArcGIS. Alfaomega Grupo Editor, S.A. de C.V., México.
- OLAYA, V. 2006. Fundamentos de análisis geográficos con Sextante. edición 1.0.revisado el 15 de julio de 2009 desde <http://sextante.sf.net>
- OLAYA, V. 2011. Sistemas de Información Geográfica. http://wiki.osgeo.org/wiki/Libro_SIG. 877 P.
- PDVSA. 2009. Código Estratigráfico de las Cuencas Petroleras de Venezuela. Revisada el 15 de julio de 2009 desde <http://www.pdvsa.com/lexico/l38w.htm>

- PRIETO, C. 2008. El Agua: sus formas, efectos, abastecimientos, usos, daños, control y conservación. (2ª.ed.). **Ecoe Ediciones**. Bogotá- Colombia.
- ROA, J. Y KAMP, U. 2008. Modelos de elevación digital (MED)a partir de sistemas satelitales. Una introducción y análisis comparativo en la cordillera de Mérida-Venezuela. **Revista Geográfica Venezolana**. 49 (1) 11-42.
- ROJAS, D. 1977. Determinación del uso y manejo de los suelos en la cuenca alta y media del río Tórbes, Táchira, Venezuela. **Universidad de Los Andes, Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales**. Mérida-Venezuela.
- ROMERO, L. 1977. Las cárcavas de la Machirí y el ministerio del ambiente y Recursos renovables. Diario La Nación. Edo. Táchira.
- SCHENK, T. 2002. Fotogrametría digital. **Marcombo**. Vol.1 Instituto de Cataluña- España.
- SPOT IMAGE. 2005a. Ficha Técnica: Resolución y modos espectrales. Revisada el 15 de julio de 2010 desde www.spotimage.com
- SPOT IMAGE. 2005b. Ficha Técnica: Niveles de preprocesamiento y precisión de localización. Revisada el 15 de julio de 2010 desde www.spotimage.com
- TAPIA, J. 2007. Introducción al Análisis de datos con SPSS para Windows. **Fondo Editorial UNELLEZ**. Universidad Ezequiel Zamora Barinas-Venezuela.
- TASSER, E.; WALDE, J.; TAPPEINER, U.; TEUTSCH, A.; NOGGLER, W. 2007. Land-use changes and natural reforestation in the Eastern Central Alps. **Agriculture, Ecosystems and Environment**. 118 (2007) 115–129.
- TRAGSA. 1994. Restauración hidrológico forestal de cuencas y control de la erosión. **Ediciones MUNDI-PRENSA**. Madrid- España.
- UZCÁTEGUI, F. 1975. Canales y Diques en la micro-cuenca Los Pinos-La Machirí (San Cristóbal). **Universidad de Los Andes, Facultad de Ciencias Forestales y ambientales**. Mérida-Venezuela.
- VIDAL, R. 2009. Control de Torrentes. CT2. Presentado en la asignatura Ingeniería de Torrentes. **Universidad de Los Andes, Facultad de Ciencias Forestales y ambientales. Centro de Estudios Forestales y Ambientales de Postgrado**. Junio. Mérida-Venezuela.
- VIVAS, L. 1992. Los Andes Venezolanos. **Academia Nacional de la Historia**. Caracas-Venezuela.

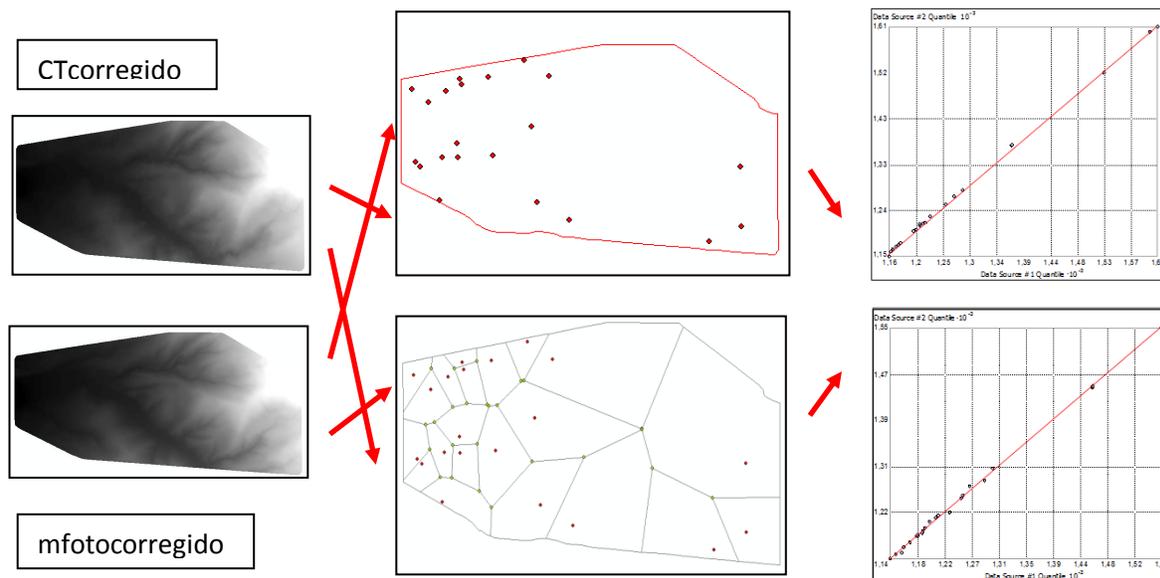
www.bdigital.ula.ve
Anexos

c.c Reconocimiento

Anexo A. Resumen de flujo de trabajo.



Anexo B. Resumen de análisis estadístico de los modelos.



Anexo C. Datos de cámara en el proceso fotogramétrico digital.

Misión 0102121 (proceso fotogramétrico).

Nombre del sensor: Wild rc 10

Distancia focal 153,48 mm

Promedio de altitud de vuelo 3.837 m.

Lente: Avigón

Abertura: 5.6 – 22 T.Exp: 1/150 – 1/1000

Campo Angular: 90°

Máxima distorsión radial (micrones): 10

Propiedades del bloque:

Proyección: UTM /Datum WGS 84/ UTM Zona: 18 Norte

Vertical Esferoide WGS 84/ Vertical Datum: WGS 84

Unidad vertical: metros

RMSE

Foto 081 RMSE 0.39 pixeles o 5.60 micrones

Foto 082 RMSE 0.62 pixeles o 8.81 micrones

Foto 083 RMSE 0.52 pixeles o 7.41 micrones

Propiedades de la generación de puntos de amarre (Método de haces de rayos):

Estrategia:

Tamaño de búsqueda: 21x21

Tamaños de correlación: 7

Densidad de características de puntos: 100%

Coefficiente limite: 0.80

Precisión inicial: 10%

Propiedades de la Aerotriangulación:

Desviación estándar puntos de la imagen: 0.33 pixeles

Máximo de interacciones: 10

Valor de convergencia: 0.00100

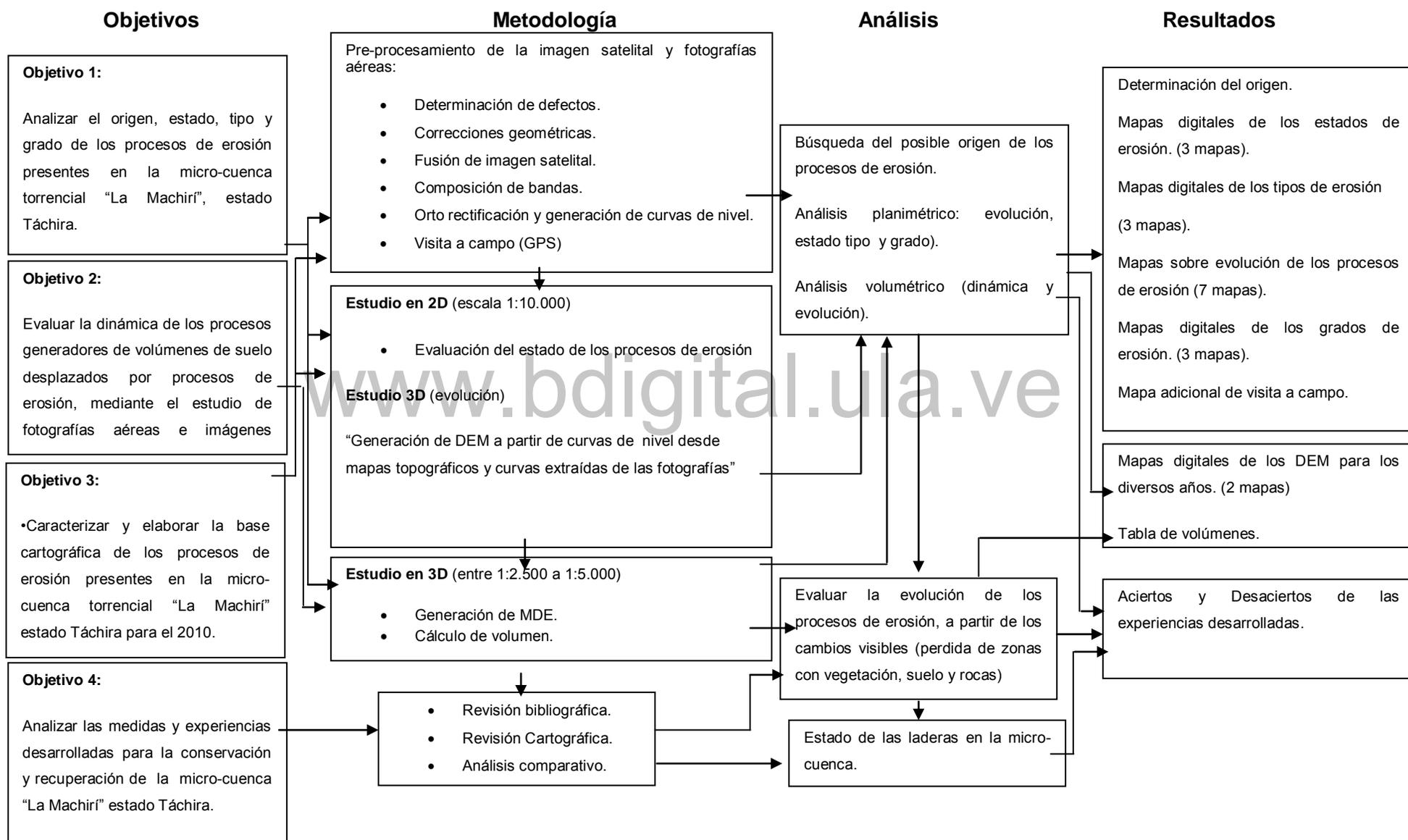
Propiedades de la Extracción del DTM

Intervalo de contornos (curvas): 10 m.

Solape entre foto 081 y 082: 61.399%

Solape entre foto 082 y 083: 64.973%

Anexo D. Resumen de metodología, análisis desarrollados y resultados obtenidos.



www.bdigital.ula.ve

c.c Reconocimiento