



M/2017

CENTRO DE ESTUDIOS FORESTALES Y AMBIENTALES DE POSTGRADO
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES Y AMBIENTALES
UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
MÉRIDA, VENEZUELA



aguas de mérida

COMPAÑÍA ANÓNIMA AGUAS DE MÉRIDA
MÉRIDA, VENEZUELA

S E R B I U L A
Tulio Febres Cordero

www.bdigital.ula.ve

**DETERMINACIÓN DE LAS FUENTES ACTUALES Y POTENCIALES DE
EROSIÓN DE LA CUENCA MEDIA Y ALTA DEL RÍO MUCUJEPE, ESTADO
MÉRIDA, VENEZUELA.**

DONACION

Ing. Yamillet Linares
M. Sc. Yajaira Ovalles (Tutor)
M. Sc. Edgar Hernández (Cotutor)
M. Sc. Juan López (Asesor)

**DETERMINACIÓN DE LAS FUENTES ACTUALES Y POTENCIALES DE
EROSIÓN DE LA CUENCA MEDIA Y ALTA DEL RÍO MUCUJEPE, ESTADO
MÉRIDA, VENEZUELA.**

Por
Yamilet Linares

Tutor
Ing. For. M. Sc. Yajaira Ovalles

Cotutor
Ing. For. M. Sc. Edgar Hernández

Asesor
Ing. For. M. Sc. Juan López

Trabajo de grado presentado para optar al Grado de Magister Scientiae en Manejo de
Cuencas

**CENTRO DE ESTUDIOS FORESTALES Y AMBIENTALES DE POSTGRADO
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES Y AMBIENTALES
UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
MÉRIDA, VENEZUELA**

**COMPAÑÍA ANÓNIMA AGUAS DE MÉRIDA
MÉRIDA, VENEZUELA
2002**

DEDICATORIA

Dedicado muy especialmente a la memoria de un gran amigo de la familia, el cual con su ejemplo de humildad, sencillez, trabajo constante y esmero en la vida, a pesar de su enfermedad mortal, me enseñó que el verdadero triunfo y la verdadera victoria se construye día a día, con trabajo, trabajo y más trabajo, con sentido de conciencia y de dedicación constante cualquiera sea el oficio y el tiempo en que se esté realizando. Para ti amigo mío, mi triunfo es tu triunfo, mi victoria es tu victoria, y, estés donde estés en la dimensión que sea, que en paz descanses (QEPD) y que Dios te guarde en el lugar que te mereces.

Gracias por ayudarme, porque muy dentro de mí sé que siempre ha sido así.

www.bdigital.ula.ve

AGRADECIMIENTO

Deseo manifestar mi agradecimiento a todas aquellas personas y organismos que contribuyeron para la realización de este trabajo de investigación.

Primeramente, a la Fuente Universal de Poder, *Dios Todopoderoso*, por ser creador y dador de vida.

A la *Virgen*, por su protección y ayuda siempre presentes en este trabajo.

A mi *Mamá*, por su amor, cariño, confianza y paciencia. De igual manera a mis *Hermanos* por sus ejemplos de lucha, trabajo constante y perseverancia en la vida.

Al *Centro de Estudios de Postgrado (CEP)* por el apoyo institucional y económico brindado.

Al *Centro de Estudios al Forestales y Ambientales de Postgrado (CEFAP)* y al personal que labora en el mismo, por su apoyo institucional al haberme dado la oportunidad de cursar estudios en él y la posibilidad de lograr una de mis más anheladas metas en esta vida, además de su apoyo logístico.

Al *Laboratorio de Fotogrametría y Sensores Remotos de la Escuela de Ingeniería Forestal (LFSR)*, puesto que gran parte de la elaboración de este trabajo de investigación se realizó en el mismo ofreciéndome siempre apoyo institucional, técnico y logístico. Agradezco altamente el apoyo brindado a algunos profesores que laboran en el LFSR:

- Al profesor *Elvecio Pernía* por su valiosa orientación y cooperación en la elaboración del mapa de vegetación y uso actual de la tierra de la cuenca en estudio.

- A los profesores *Juan López, Otto Jurguenson y Ennio Pozzobon* por el asesoramiento en diversas fases del trabajo como: la elaboración de los mapas; además del procesamiento, la obtención y el análisis de los resultados de todos esos productos cartográficos.

Al profesor *Ernesto Flores*, quien labora en el Instituto de Fotogrametría de la Facultad de Ingeniería, por su efectiva orientación en la concepción del modelo matemático de erosión potencial y en la ponderación de algunas variables del mismo.

Manifiesto mi gratitud a los profesores *Edgar Hernández y Yajaira Ovalles* por la guiatura y colaboración prestada en todo lo referente a la parte hidro-climática de la mencionada cuenca.

Agradezco a los profesores *Omaira Márquez y Leonardo Lugo* por la colaboración prestada en las ponderaciones de las propiedades consideradas del suelo. También, al técnico *Vielma* por su ayuda en el procesamiento de las muestras de suelos tomadas en la cuenca.

Al *Doctor Oscar Odreman*, Director del Instituto Nacional de Geología y Minería (INGEOMIN), por su asesoramiento en la ponderación de las unidades lito-estratigráficas evaluadas presentes en la cuenca estudiada.

Al *Consejo de Desarrollo Científico, Tecnológico y Humanístico* de la ULA (CDCTH), por su apoyo institucional y económico prestado durante la realización del trabajo de grado.

A la *Compañía Anónima Aguas de Mérida*, a la cual le debo su apoyo institucional, económico y logístico. Particularmente a los Ingenieros *Leonardo Trejo* y *Elizabeth Parra*.

Al *MARN-El Vigía* por el apoyo institucional y logístico suministrado en la fase inicial de este proyecto, especialmente al *Ing. For. José Peña*, por su valiosa colaboración para la realización de esta investigación. De igual manera, al *MARN-Mérida* por su apoyo institucional y logístico, especialmente al *Geógrafo Pettit* por los datos de precipitación suministrados de las estaciones climatológicas consideradas en el área de estudio.

Otros profesores han hecho contribuciones invaluable y muy significativas en pro de este trabajo, entre los que caben señalar: *Argenis Mora*, *Clemente Hernández*, *Rafael Rojas*, *Hervé Jégat*, *Alex Barrios* y *Armando Rondón*.

Agradezco enormemente la colaboración brindada a todo el personal que labora en el *Taller de Publicaciones* de la Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales de la ULA.

Todos ustedes fueron pilares fundamentales para la realización de este trabajo de grado, puesto que sin su valioso apoyo, ayuda, colaboración y aportes no hubiese sido posible la realización del mismo, por todo ello *mi eterna gratitud*.

Ing. For. Yamilet Linares
Magister Scientiae en Manejo de Cuencas
Mérida, junio 2002

RESUMEN

La cuenca del Río Mucujepe del Estado Mérida en las últimas décadas, como lo señalan diversas fuentes: MARNR (1992a), MARNR (1992b), Solsona (1990a) y Solsona (1990b), ha venido siendo objeto de intervenciones antrópicas que sumadas a las condiciones naturales de fragilidad y susceptibilidad de la misma ha adquirido un carácter degradativo fuerte, que genera problemas tanto en la calidad como en la cantidad de agua destinada a diversos usos.

En este contexto, este trabajo tuvo como propósito fundamental determinar las fuentes actuales y potenciales de erosión en la parte media y alta de la cuenca del Río Mucujepe, cuenca de suma importancia para el Estado Mérida por ser fuente principal de abastecimiento de agua para la ciudad de El Vigía, y para otros centros poblados vecinos. Este objetivo fue logrado mediante la realización de un diagnóstico integral del estado de conservación actual de la cuenca, a través del uso de cartas topográficas, mapas temáticos de diferentes variables ambientales, fotografías aéreas e investigaciones de campo, además del desarrollo e implementación de un modelo matemático particular, utilizando un Sistema de Información Geográfica (SIG).

Los resultados logrados según el presente estudio fueron los siguientes:

La superficie de la cuenca del Río Mucujepe es de 17.148 ha. De esta superficie, 1.859 ha están afectadas con erosión actual, valor que en porcentaje representa el 10,83 % del área en estudio.

Los valores porcentuales de erosión potencial en la cuenca estudiada por categorías de susceptibilidad a la erosión hídrica son los siguientes: el 0,04 % posee *baja susceptibilidad*, el 70,73 % de la cuenca corresponde a áreas con *moderada susceptibilidad*; el 28,75 % presenta áreas con *alta susceptibilidad* y el 0,47 % del total de área estudiado tienen *muy alta susceptibilidad* a la erosión hídrica.

Los resultados antes señalados servirán de soporte para una investigación posterior que sugiera y diseñe acciones de carácter restaurativo para minimizar o controlar la erosión actual existente en la cuenca, así como también para preservar áreas detectadas con erosión potencial, sobre todo las áreas con alta, y muy alta susceptibilidad a la erosión hídrica. De este modo se podrá contribuir a un mayor beneficio social, ecológico y económico para los pobladores de la zona de la cuenca del Río Mucujepe.

Palabras Claves: Erosión hídrica, erosión actual, erosión potencial, cuencas altas, SIG, IDRISI, modelos matemáticos, variables ambientales, parámetros ambientales, calidad de agua.

ABSTRACT

As it has been pointed out by several authors: MARNR (1992a), MARNR (1992b), Solsona (1990a) and Solsona (1990b), during the last decades, the basin of the Mucujepe River, at Mérida State, has been affected by anthropic interventions which along with its natural conditions of fragility and susceptibility have conducted to a strong degradative character of it, that generates problems regarding the quality and quantity of the water for diverse uses.

In this context, this research had as the fundamental goal to determine the actual and potential sources of erosion at the medium and upper part of the Mucujepe River basin, which is of top significance to the Merida State, as main source of drinking water for the El Vigía city and other population centers in the vicinity. This goal was accomplished undertaking an integral diagnosis of the actual conservation status of the basin, through the design and implementation of a particular mathematical model on a Geographical Information System (GIS), which incorporated data and information from topographic and thematic maps, aerial photography and field investigations.

The main results of the study were:

The area the Mucujepe River basin is 17.148 hectares. Of this, 1.859 hectares are affected by actual erosion, which represents 10,8% of the study area.

The percentage values of the area affected by the different categories of susceptibility to water erosion are the following: the 0,04% of the basin extent corresponds to areas with *low susceptibility*; the 70,73% of the basin extent corresponds to areas with *moderate susceptibility*; the 28,75% to areas with *high susceptibility*, and the 0,47% of the basin extent corresponds to areas with *very high susceptibility* to water erosion.

There results will be useful to support a future investigation directed to suggest and to design restaurative actions to minimize and to control the actual erosion in the basin, and also to preserv the effect of the potential erosion, particularly the areas qualified as having high and very high susceptibility to water erosion. This actions could contribute to improve the social, ecologic and economic benefits for the people settled on the area of the Mucujepe River basin.

Key words: Water erosion, actual erosion, potential erosion, high basin, GIS, IDRISI, mathematical mothels, environmental variables, environmental parameters, water quality.

CONTENIDO

	Pág.
DEDICATORIA.....	i
AGRADECIMIENTO.....	ii
RESUMEN.....	iv
ABSTRACT.....	v
CONTENIDO.....	vi
LISTA DE TABLAS.....	viii
LISTA DE GRÁFICOS.....	xii
LISTA DE FIGURAS.....	xiv
LISTA DE FOTOGRAFÍAS.....	xvi
LISTA DE ANEXOS.....	xviii
<u>CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN</u>	1
1.1. El problema, su importancia y justificación.....	1
1.2. Objetivos del estudio.....	1
1.3. Antecedentes.....	1
<u>CAPÍTULO II. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO</u>	11
2.1. Ubicación del área de estudio.....	11
2.2. Características físico-naturales.....	14
<u>CAPÍTULO III. MATERIALES Y METODOLOGÍA</u>	34
3.1. <i>Materiales, equipos y software</i>	34
3.1.1. Materiales.....	34
3.1.2. Equipos y software.....	34
3.2. <i>Metodología</i>	35
3.2.1. Base de datos y los Sistemas de Información Geográfica (SIG).....	35
3.2.2. Desarrollo del modelo matemático de erosión actual y potencial.....	37
3.2.2.1. Consideraciones del modelo matemático de erosión actual y potencial desarrollado e implementado en esta investigación.....	37
3.2.2.2. Modelización para determinar erosión actual del Río Mucujepe.....	37
A) Conceptualización del modelo matemático de erosión actual.....	37
B) Modelo matemático de erosión actual.....	40
3.2.2.3. Modelización para determinar erosión potencial del Río Mucujepe.....	41
A) Conceptualización del modelo matemático de erosión potencial.....	41
B) Asignación de pesos de los cuatro componentes del modelo de erosión potencial.....	44
b.1. Componente fisiográfico.....	44
b.2. Componente suelo.....	46
b.3. Componente morfobioclimático.....	61
b.4. Componente de utilización de la tierra.....	70

	Pág.
<u>CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</u>	76
<i>4.1. Vegetación y uso actual de la tierra de la cuenca media y alta del Río Mucujefe</i>	76
4.1.1. Descripción de los tipos de vegetación y uso actual de la tierra de la cuenca del Río Mucujefe.....	76
4.1.2. Superficies de los tipos de vegetación y uso actual de la tierra y análisis de los mismos.....	89
<i>4.2. Fuentes actuales productoras de erosión de la cuenca media y alta del Río Mucujefe</i>	97
4.2.1. Erosión actual.....	97
4.2.2. Comparación de la bondad de los resultados logrados con el modelo matemático de erosión actual.....	102
4.2.2.1. Los sedimentos.....	103
4.2.2.2. La turbidez.....	109
<i>4.3. Fuentes potenciales productoras de erosión de la cuenca media y alta del Río Mucujefe</i>	113
4.3.1. Componentes ambientales del modelo matemático de erosión potencial.....	113
A. Componente fisiográfico (CF).....	113
B. Componente suelo (CS).....	117
C. Componente morfobioclimático (CMB).....	117
D. Componente de utilización de la tierra (CUT).....	125
4.3.2. Erosión potencial.....	132
4.3.3. Comparación de la bondad de los resultados logrados con el modelo matemático de erosión potencial.....	137
<u>CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</u>	141
5.1. Conclusiones.....	141
5.2. Recomendaciones.....	142
<u>CAPÍTULO VI. REFERENCIAS BIBLIOHEMEROGRÁFICAS</u>	144
ANEXOS	148

LISTA DE TABLAS

Tabla	Pág.
2.1. Caracterización de las unidades lito-estratigráficas presentes en la parte media y alta de la cuenca del Río Mucujepe.....	17
2.2. Caracterización de algunas variables climáticas en tres estaciones climatológicas cercanas a la cuenca del Río Mucujepe.....	21
2.3. Distribución de los años más húmedos y más secos de las seis estaciones evaluadas....	25
2.4. Breve caracterización de las subunidades taxonómicas de suelos de la parte media y alta de la cuenca del Río Mucujepe.....	31
3.1. Etapas contenidas en el desarrollo de una base de datos.....	36
3.2. Descripción de las fotografías aéreas utilizadas para elaborar el mapa de vegetación y uso actual de la tierra de la parte media y alta de la cuenca del Mucujepe.....	39
3.3. Asignación de pesos de las unidades lito-estratigráficas presentes en la parte media y alta del Río Mucujepe.....	44
3.4. Asignación de pesos a los rangos porcentuales de pendiente en la parte media y alta del Río Mucujepe.....	45
3.5. Grupos texturales.....	48
3.6. Asignación de pesos de la clase textural.....	49
3.7. Asignación de pesos de los tipos de estructura.....	50
3.8. Interpretación de valores relativos de carbono orgánico y materia orgánica de un perfil de suelo.....	51
3.9. Asignación de pesos de los contenidos porcentuales de materia orgánica.....	51
3.10. Valores de la velocidad de la permeabilidad y su capacidad de almacenaje según la clase textural de los suelos.....	53
3.11. Clase de permeabilidad del perfil, según la codificación del USDA-Soil Survey Manual.....	53

Tabla	Pág.
3.12. Calificación de la permeabilidad según el tipo de clase textural.....	53
3.13. Asignación de pesos de la permeabilidad.....	54
3.14. Asignación de pesos de las propiedades consideradas en los suelos de la cuenca media y alta del Río Mucujepe.....	54
3.15. Propiedades evaluadas de los suelos, por subunidades taxonómicas, en la cuenca media y alta del Río Mucujepe.....	57
3.16. Ponderación de las propiedades evaluadas en las subunidades taxonómicas de los suelos de la cuenca media y alta del Río Mucujepe, según su susceptibilidad a la erosión.....	58
3.17. Caracterización general de los perfiles evaluados en campo de los suelos en la cuenca media y alta del Río Mucujepe.....	59
3.18. Propiedades evaluadas del Horizonte A (HA) de cada subunidad taxonómica de suelo de la cuenca media y alta del Río Mucujepe.....	60
3.19. Ponderación de los perfiles muestreados en cada subunidad taxonómica de suelo de la cuenca media y alta del Río Mucujepe, según su susceptibilidad a la erosión.....	60
3.20. Estaciones climatológicas más representativas de la cuenca media y alta del Río Mucujepe.....	62
3.21. Modelos de regresión lineal para estimar intensidades máximas para 6 horas de duración y 2 años de período de retorno de las estaciones Mucujepe y La Cuchilla.....	62
3.22. Asignación de pesos a la intensidad máxima para 6 horas de duración y 2 años de período de retorno, cuenca media y alta del Río Mucujepe.....	63
3.23. Temperatura promedio anual de las estaciones climatológicas cercanas a la cuenca media y alta del Río Mucujepe.....	64
3.24. Isotermas al relieve de la parte media y alta de la cuenca del Río Mucujepe.....	65
3.25. Asignación de pesos a los promedios anuales de temperatura (°C/año) de la cuenca media y alta del Río Mucujepe.....	65
3.26. Asignación de pesos a las zonas de vida presentes en la cuenca media y alta del Río Mucujepe.....	66

Tabla	Pág.
3.27. Grados de meteorización química presentes en la parte media y alta de la cuenca del Río Mucujepe.....	68
3.28. Asignación de pesos a los grados de meteorización química en la cuenca media y alta del Río Mucujepe.....	69
3.29. Descripción del grado de protección que ofrece al suelo cada tipo de cobertura vegetal.....	72
3.30. Calificación de los índices de protección.....	72
3.31. Descripción y calificación de los índices de protección.....	73
3.32. Asignación de pesos de la vegetación actual de la cuenca del Río Mucujepe, en función del grado de protección que ofrece al suelo.....	74
3.33. Escala de asignación de pesos de la vegetación actual de las partes media y alta de la cuenca del Río Mucujepe.....	75
4.1. Listado de especies vegetales arbóreas presentes en la parte media y alta de la cuenca del Río Mucujepe.....	87
4.2. Listado de especies vegetales arbustivas presentes en la parte media y alta de la cuenca del Río Mucujepe.....	88
4.3. Listado de las gramíneas presentes en la parte media y alta de la cuenca del Río Mucujepe.....	88
4.4. Listado de cultivos agrícolas y hortícolas presentes en la parte media y alta de la cuenca del Río Mucujepe.....	89
4.5. Caracterización de los tipos de vegetación y uso actual de la tierra encontrados en la parte media y alta del Río Mucujepe.....	90
4.6. Superficies absolutas, en ha, y relativas, en %, de los tipos de vegetación y uso actual de la tierra de la parte media y alta del Río Mucujepe, por subcuencas, correspondientes al 2001.....	93
4.7. Superficie, en hectáreas y porcentuales, de los tipos de pendiente en los que se encuentran los tipos de tipos de vegetación y uso actual de la tierra de la parte media y alta del Río Mucujepe.....	95

Tabla	Pág.
4.8. Superficies absolutas, en ha, y relativas, en %, de áreas con erosión actual por subcuencas, partes media y alta de la cuenca del Río Mucujepe.....	101
4.9. Aportes de sedimentos de una cuenca.....	106
4.10. Erosión potencial de las partes media y alta del Río Mucujepe, discriminada por subcuencas.....	134
4.11. Rangos de erosión potencial según el Proyecto SHT.....	136
4.12. Rangos del índice de riego de erosión (IRE) o erosión potencial.....	136
4.13. Pérdida anual de suelo de las partes media y alta de la cuenca del Río Mucujepe, por subcuencas, en tn/año, tomando los rangos de erosión potencial del Proyecto SHT....	136
4.14. Pérdida anual de suelo de las partes media y alta de la cuenca del Río Mucujepe, por subcuencas, en tn/año, tomando los rangos del IRE según Delgado.....	137
4.15. Áreas con erosión actual presentes en sitios con alta y muy alta susceptibilidad a la erosión hídrica en las partes media y alta de la cuenca del Río Mucujepe, discriminada por subcuencas.....	138

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico	Pág.
2.1. Valores promedios mensuales de precipitación para 17 años de registro de las 6 estaciones consideradas.....	24
2.2. Año más seco, año más húmedo y promedio mensual de precipitación de la Estación Mucujepe.....	26
2.3. Año más seco, año más húmedo y promedio mensual de precipitación de la Estación La Cuchilla.....	27
2.4. Precipitación promedio mensual, para 17 años de registro, de las estaciones climatológicas Mucujepe y La Cuchilla.....	27
2.5. Caudales medios diarios de Caña Brava y Cacique.....	29
2.6. Tipos de vegetación y uso actual de la tierra agrupados, partes media y alta de la cuenca Río Mucujepe, año 2001.....	33
4.1. Porcentajes de los tipos de vegetación y uso actual de la tierra de la parte media y alta de la cuenca del Río Mucujepe.....	91
4.2. Porcentajes de los tipos de vegetación y uso actual de la tierra, por subcuencas, parte media y alta de la cuenca del Río Mucujepe.....	94
4.3. Superficie de los tipos de vegetación y uso actual de la tierra para cada rango porcentual de pendiente.....	96
4.4. Superficies porcentuales de erosión actual por subcuencas, parte media y alta del Río Mucujepe.....	102
4.5. Concentraciones porcentuales de sedimento comparativo entre Caña Brava y Cacique.....	104
4.6. Valores diarios de precipitación en mm, correspondiente a 1989 y 1990, de la Estación Climatológica Mucujepe.....	108
4.7. Valores de turbidez desde 1997 hasta 2001, presentes en las subcuencas Cacique y Caña Brava del Río Mucujepe.....	111
4.8. Relación entre precipitación promedio mensual y turbidez de 1997.....	112

Gráfico	Pág.
4.8a. Valores de turbidez presentes en las subcuencas Cacique y Caña Brava del Río Mucujepe.....	112
4.8b. Valores promedios mensuales de precipitación en mm del año 1997 de las estaciones climatológicas Mucujepe y La Cuchilla.....	112
4.9. Rangos porcentuales de pendiente de la cuenca media y alta del Río Mucujepe.....	115
4.10. Categorías de erosión potencial de la cuenca estudiada.....	132
4.11. Porcentajes de las categorías de erosión potencial por subcuencas, partes media y alta del Río Mucujepe.....	134
4.12. Erosión actual localizada en sitios con alta y muy alta susceptibilidad a la erosión hídrica, por subcuencas, partes media y alta de la cuenca del Río Mucujepe.....	138

www.bdigital.ula.ve

LISTA DE FIGURAS

Figura	Pág.
2.1. Ubicación relativa estatal y nacional del área de estudio.....	11
2.2. Mapa topográfico de la cuenca del Río Mucujepe, Estado Mérida.....	12
2.3. Mapa de la cuenca del Río Mucujepe, con la ubicación del sector del Parque Nacional Sierra de La Culata incluido dentro de la cuenca estudiada.....	13
2.4. Subcuencas de las partes media y alta de la cuenca del Río Mucujepe.....	15
2.5. Ubicación de las unidades lito-estratigráficas presentes en las partes media y alta de la cuenca del Río Mucujepe.....	16
2.6. Zonas de vida según Holdridge en las partes media y alta de la cuenca del Río Mucujepe.....	23
2.7. Subunidades taxonómicas de suelos presentes en las partes media y alta de la cuenca del Río Mucujepe.....	32
3.1. Esquematación del desarrollo metodológico del modelo de erosión potencial diseñado en el presente estudio.....	43
4.1. Vegetación y uso actual de la tierra de las partes media y alta de la cuenca del Río Mucujepe.....	77
4.2. Mapa de los cuatro rangos porcentuales de pendiente de las partes media y alta de la cuenca del Río Mucujepe.....	98
4.3. Focos erosivos actuales detectados en campo y complementados con fotografías aéreas en las partes media y alta de la cuenca del Río Mucujepe.....	99
4.4. Erosión actual, detectada e inferida, en las partes media y alta de la cuenca del Río Mucujepe.....	100
4.5. Componente geológico ponderado de las partes media y alta de la cuenca del Río Mucujepe.....	114
4.6. Componente fisiográfico ponderado de las partes media y alta de la cuenca del Río Mucujepe.....	116

Figura	Pág.
4.7. Componente suelo ponderado de las partes media y alta de la cuenca del Río Mucujepe.....	118
4.8. Intensidades máximas, para 6 horas de duración y 2 años de período de retorno, de las partes media y alta de la cuenca del Río Mucujepe.....	119
4.9. Intensidades máximas ponderadas, para 6 horas de duración y 2 años de período de retorno, de las partes media y alta de la cuenca del Río Mucujepe.....	120
4.10. Isotermas al relieve de temperaturas medias anuales de las partes media y alta de la cuenca del Río Mucujepe.....	122
4.11. Isotermas al relieve de temperaturas medias anuales ponderadas de las partes media y alta de la cuenca del Río Mucujepe.....	123
4.12. Zonas de vida según Holdridge ponderadas de las partes media y alta de la cuenca del Río Mucujepe.....	124
4.13. Grado de meteorización química de las partes media y alta de la cuenca del Río Mucujepe.....	126
4.14. Grado de meteorización química ponderado de las partes media y alta de la cuenca del Río Mucujepe.....	127
4.15. Componente morfobioclimático ponderado de las partes media y alta de la cuenca del Río Mucujepe.....	128
4.16. Mapa de los tres rangos porcentuales de pendiente de las partes media y alta de la cuenca del Río Mucujepe.....	130
4.17. Componente de utilización de la tierra ponderado de las partes media y alta de la cuenca del Río Mucujepe.....	131
4.18. Categorías de erosión potencial en las partes media y alta de la cuenca del Río Mucujepe.....	133
4.19. Áreas con erosión actual presentes en sitios con alta y muy alta susceptibilidad a la erosión hídrica en las partes media y alta de la cuenca del Río Mucujepe.....	140

LISTA DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía	Pág.
2.1. Tope de una terraza del Cuaternario ubicada al este del Río Mucujepe (24/09/2000), en las cercanías del poblado Mucujepe.....	19
2.2. Colinas de rocas sedimentarias, al oeste de la subcuenca Caña Brava (24/09/2000), en las cercanías del poblado Mucujepe.....	20
2.3. Sistema de montañas altas localizadas al oeste de la subcuenca Caña Brava (24/09/2000), parte media de la cuenca del Río Mucujepe.....	20
2.4. Sección de control de lectura del Río Caña Brava, con vegetación intervenida y de pastizales en sus alrededores.....	30
2.5. Río Caña Brava, aguas arriba del dique toma, donde se evidencia su torrencialidad. A la izquierda del cauce se aprecia vegetación intervenida y a su derecha pastizales puros.....	30
3.1. Perfil de suelo # 2. Sector Mesa del Caraño (05/04/2001), parte media de la cuenca del Río Mucujepe.....	56
4.1. Panorámica de un bosque medio denso (BMD) presente en la parte media de la cuenca del Río Mucujepe.....	79
4.2. A la izquierda se aprecia un yagrumo de hojas plateadas (<i>Cecropia sp.</i>) y, a la derecha, algunos individuos arbóreos de tambor (<i>Vochysia meridensis</i>) con flores amarillas.....	80
4.3. A la izquierda de la fotografía se muestra una porción de bosque intervenido (BI). También se aprecian dos áreas deforestadas, una arriba y a la izquierda, y la otra, en la parte central de la misma.....	80
4.4. En primer plano, potrero con cívaro (<i>Myrcia acuminata</i>) cerca de la iglesia del sector La Sabana, alrededor de los 1.800 msnm, localizado en la parte alta de la cuenca del Río Mucujepe. En el plano medio, pastizales puros y al fondo, bosque intervenido.....	82
4.5. Combinación de un pastizal arbolado (PA) con un pastizal puro (PP) en la parte alta de la cuenca del Río Mucujepe.....	82
4.6. Potrero puro y bosque intervenido (al fondo) localizados alrededor de los 2.000 msnm, parte alta de la cuenca del Río Mucujepe.....	83

Fotografía	Pág.
4.7. Combinación de un pastizal arbolado con un pastizal puro, además de la presencia dominante (abajo y a la izquierda) del helecho helecho (<i>Pteridium aquilinum</i>) a aproximadamente 1.000 msnm de la parte media de la cuenca del Río Mucujepe.....	83
4.8. Matorrales localizados a unos 1.000 msnm de la parte media de la cuenca del Río Mucujepe.....	84
4.9. Parcelas de siembra de papa var. granola (<i>Solanum tuberosum</i>) dentro de potreros puros a ambos lados de la carretera de tierra, vía La Trampa, cercanos a los 2.200 msnm, parte alta de la cuenca del Río Mucujepe.....	84
4.10. Parcelas con cultivos permanentes de caña de azúcar (<i>Saccharum officinarum</i>) y camburales (<i>Musa sapientum</i>) dentro de pastizales puros (abajo) y matorrales (arriba y la derecha), parte media de la cuenca del Río Mucujepe.....	85
4.11. Siembra de café (<i>Coffea arabica</i>) con sombra de guamo (<i>Inga edulis</i>) a unos 1.200 msnm, parte media de la cuenca del Río Mucujepe.....	86
4.12. Acercamiento de un cultivo permanente, café con guamo, localizado a unos 1.000 msnm de la parte media de la cuenca del Río Mucujepe.....	86
4.13. Erosión actual en un área cercana a los 400 msnm en la subcuenca Caña Brava, parte media de la cuenca del Río Mucujepe.....	101

LISTA DE ANEXOS

Anexo	Pág.
1. Caracterización de las subunidades taxonómicas de los suelos de la cuenca media y alta del Río Mucujepe.....	149
2. Datos de precipitación de las estaciones climatológicas cercanas a la cuenca del Mucujepe.....	154
3. Precipitación diaria (mm/día) de 1989 y 1990 de la Estación Mucujepe.....	158
4. Lluvias extremas (mm) para 6 horas de duración, de las estaciones climatológicas Mucujepe y La Cuchilla.....	160
5. Gráficos de lluvias extremas para 6 horas de duración, de las estaciones climatológicas Mucujepe y La Cuchilla.....	161
6. Concentración porcentual de sedimentos en los diques Caña Brava y Cacique, correspondiente a los años 1989 y 1990.....	162
7. Valores de turbidez del agua en los diques Cacique y Caña Brava, correspondientes a los años 1997, 2000 y 2001.....	164

1.1. El problema, su importancia y justificación.

El agua constituye el elemento básico para la vida; el agua y la vida son inseparables. La carencia de una fuente de suministro de agua limpia condena la vida, debido a que la falta de agua potable es una de las principales causas de desnutrición que entorpece el desarrollo intelectual.

Puesto que los principales problemas ambientales que se plantean en casi todas las cuencas hidrográficas son la calidad y cantidad del agua, se hace necesario recurrir a estudios que determinen y evalúen las causas de los problemas asociados a ellos y luego proponer soluciones a través de acciones preventivas o restaurativas.

La cuenca del Río Mucujepe constituye la fuente de abastecimiento principal de agua para consumo para El Vigía, segunda ciudad en población del Estado Mérida y la más importante dentro de la estratégica zona sur del Lago de Maracaibo. En esta cuenca en los actuales momentos, como lo señalan diversas fuentes (MARNR, 1992a; MARNR, 1992b; Solsona, 1990a y Solsona, 1990b), existe el 86 %, que representan 13.903 ha, de tierras con fragilidad natural, altas tasas de deforestación en su parte media y un uso inadecuado de las tierras en ciertos sectores, contribuyendo todo ello a incrementar los procesos de erosión y sedimentación hacia las obras de captación ubicadas en los ríos Cacique y Caña Brava, lo que eleva por tanto los costos de potabilización del elemento vital.

La determinación de las fuentes actuales y potenciales de erosión en la parte media y alta de la cuenca del Río Mucujepe son los objetivos centrales de este trabajo de investigación, llevados a cabo a través del desarrollo e implementación de un modelo matemático particular, utilizando para ello un Sistema de Información Geográfica (SIG).

1.2. Objetivos del estudio.

Los objetivos fundamentales del presente estudio son los siguientes:

- 1) Determinar las fuentes actuales de erosión de las partes media y alta de la cuenca del Río Mucujepe, y
- 2) Determinar las fuentes potenciales de erosión de las partes media y alta de la cuenca del Río Mucujepe.

1.3. Antecedentes.

Los antecedentes se discretizan en estudios basados en los dos aspectos principales que contempla esta investigación:

- A) Erosión y B) Sistemas de Información Geográfica.

A) Erosión.

- Aspectos introductorios de la erosión.

La erosión (del latín erosio = roedura) consiste en una pérdida gradual del material que constituye el suelo, al ir siendo arrastradas las partículas (disgregadas, arrancadas y transportadas), a medida que van quedando en superficie (Porta, López y Roquero, 1999). Este concepto se aplica a las diversas maneras como los agentes agua y viento intervienen en el desprendimiento y transporte de materiales de sedimentación y meteorización. En este trabajo de investigación se evaluó a la primera forma, es decir, a la erosión hídrica.

La erosión hídrica, consiste en el proceso de disgregación y transporte de las partículas del suelo por la acción del agua. El ciclo completo de la erosión culmina con el depósito de los materiales transportados por la corriente en áreas de sedimentación, cuando la capacidad de arrastre de las aguas de arroyada se reduce hasta el punto de no permitir la continuación en el flujo de las partículas terrosas previamente incorporadas al mismo (Mintegui y López, 1990).

El agua es el principal factor erosivo a nivel local, pues la acción del viento es de poca consideración ya que está limitada a pequeñas áreas. El agua actúa en dos formas sobre el suelo: primero afloja y desprende las partículas del suelo desnudo y luego produce su arrastre (Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, 1979).

Se distinguen, según el Ministerio de Hacienda y Crédito Público (1996), diversos tipos de erosión : 1) Erosión por escorrentía, 2) erosión fluvial, 3) erosión geológica y 4) erosión acelerada.

En la **erosión por escorrentía**, a su vez, se distinguen tres formas de erosión: Laminar, en surcos y en cárcavas. La erosión laminar se refiere a la remoción de suelo en una capa delgada, no forma canales de desagüe. En ella, los procesos erosivos que intervienen son principalmente erosión pluvial y escurrimiento difuso y se asocia a grados de erosión ligera. La erosión en surcos hay formación de pequeños surcos o canales con algún grado de concentración de la escorrentía; se asocia a grados de erosión moderada. La erosión en cárcavas se caracteriza por la disectación profunda del suelo; se relaciona con grados de erosión severa y muy severa (Ministerio de Hacienda y Crédito Público, 1996).

En la **erosión fluvial** se diferencian tres procesos: Socavamiento linear, desprendimientos y desplomes y, el tercer proceso, erosión por regresión progresiva. El socavamiento linear se refiere a la profundización de valles o cárcavas o alteración hacia los lados por acción de las corrientes de agua, dependiendo fundamentalmente del caudal, pendiente, litología, etc. Los desprendimientos y desplomes se presentan por la acción de aguas de infiltración, cambios en el estado de humedad de los suelos, fenómenos de meteorización. La erosión por regresión progresiva se manifiesta en el alargamiento de los valles y reducción de la altura de las divisorias de aguas (Ministerio de Hacienda y Crédito Público, 1996).

La **erosión geológica o natural** es aquella que se produce normalmente, de forma espontánea en la naturaleza, y que actúa sin la intervención del hombre, su intensidad varía de unos escenarios a otros. Es tan lenta que pasa desapercibida y contribuye a la formación del relieve (Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, 1979).

La **erosión acelerada** es causada con la intervención del hombre, quien al cultivar el suelo destruye la vegetación protectora y rompe el equilibrio dinámico que la naturaleza ha establecido entre formación del suelo y erosión natural, ayudando así a que la erosión adquiera velocidad y provoque grandes daños (Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, 1979). La intervención del hombre hace que la intensidad del proceso pueda verse fuertemente incrementada.

- *Estudios realizados de erosión.*

En los últimos años se ha venido observando una creciente preocupación por parte de muchos países en el mundo, por el problema de la erosión de las cuencas hidrográficas. Yoon y Woo (2000) señalan que la península coreana, desde tiempos históricos, ha estado sujeta a extremos hidrológicos lo que ha inducido a desarrollar aspectos investigativos de la Ingeniería Hidráulica en Korea; sin embargo, el estudio de la problemática de sedimentos en este país es bastante reciente, desarrollándose ésta parte sólo en las últimas décadas.

Al oeste de Java, en Indonesia, la erosión de los suelos ha ocurrido en una proporción alarmante convirtiéndose en un serio problema ambiental. López (1988) y Jackson (1989), citados por López (1999), la consideran un problema ambiental crítico.

En Venezuela, el problema de la erosión es uno de los más complejos viéndose favorecido por nuestra condición de país tropical, con las más variadas condiciones climáticas; además de contar con una configuración tan variada en la morfología de nuestro relieve físico, que conlleva a las grandes diferencias de altitud y presentar especiales condiciones geológicas de los suelos de cobertura muy erodables, en algunas zonas casi o totalmente desprovistas de una cubierta vegetal; incrementando todo ello el transporte de sedimentos por corrientes fluviales (MOP, 1969).

En la cuenca del Río Mucujepe específicamente, desde hace varios años se han realizado estudios de diferente tipo que describen la problemática de la misma en lo que a erosión se refiere. A continuación se describen los diferentes estudios realizados en la cuenca en cuestión.

1) Estudios físico-naturales

Solsona (1979) realizó un estudio de factibilidad para la construcción de una presa de tierra sobre el Río Mucujepe, la cual no sólo tendría como utilidad lograr el almacenamiento de los volúmenes requeridos para satisfacer las necesidades para ese momento sino que protegería contra inundaciones y se lograría el saneamiento total y definitivo en más de 30.000 ha localizadas aguas abajo de la presa.

Según el MARNR (1991b) en la cuenca del Río Mucujepe hay una elevada tasa de producción de sedimentos. El MARNR (1992b) sostiene que existen 13.902,7 ha (86 % de la superficie bajo estudio) con elevada susceptibilidad a erosionarse.

Por lo antes expuesto y siguiendo con la parte estructural, en el proyecto control de torrentes Río Caña Brava, se propone la construcción de un dique de concreto ciclópeo y un contradique, para disminuir el aporte de sedimentos producidos (MARNR, 1991a).

El MARNR (1991b) realizó un análisis de demanda-disponibilidad del recurso agua en la cuenca del Río Mucujepe indicando la inexistencia de problemas en cuanto a la cantidad de este elemento; el problema existente es la calidad del mismo dado que el uso principal al cual se le destina es el abastecimiento urbano.

En materia de calidad del agua, Solsona (1990a) realizó un análisis físico-químico del agua en la mencionada cuenca, en el que se presentan resultados de seis muestras para el Río Mucujepe e igual número para el Afluente Caña Brava. Entre algunos parámetros evaluados estuvo la turbidez. Resultados de estos análisis para ese entonces evidenciaron que tanto el Río Mucujepe como el Caña Brava presentaban un alto grado de turbidez en los meses de abril, mayo y junio (época de lluvia).

Para contribuir un poco a la restauración de la cuenca, en el aspecto vegetativo, el MARNR (1991c) emprendió un proyecto agroforestal en la subcuenca de los ríos Caña Brava-Mucujepe, el cual tuvo como objetivo principal establecer especies forestales con cultivos agrícolas combinadas con prácticas de conservación de suelos y aguas.

2) Estudios socio-económicos

Goyo y Leal (1987), citadas por Solsona (1990b), caracterizaron socio-económicamente a la parte media y alta de la cuenca del Río Mucujepe a través de una encuesta de 229 viviendas (muestra estudiada), indicando que los resultados de las mismas no reflejaban la realidad total del área en estudio. Esta caracterización abarcó los siguientes aspectos:

En esta cuenca para 1987 se apreciaba una insuficiencia de servicios médico-sanitarios rurales. Funcionaban 15 escuelas y un liceo; había disponibilidad de agua potable en todas las viviendas de los diversos asentamientos poblacionales; a excepción de las viviendas dispersas en el área de páramo, los demás sectores gozaban de alumbrado público; el 82,5 % de las viviendas tenían baños con sistema sumidero, un 10,92 % disponían de excretas a campo abierto y un 6,55 % tenían letrinas. El 7 % de las viviendas gozaban del servicio de aseo urbano, un 34,50 % botaban los residuos sólidos a campo abierto y el 53,28 % de las viviendas los quemaba y usaba como abono. Las condiciones de vivienda eran buenas; el 87,34 % de viviendas encuestadas eran casas en buen estado.

En la parte alta de la cuenca las condiciones de vida de sus habitantes eran bajas; siendo sus servicios básicos muy deficientes. En la parte media de la cuenca los pobladores tenían condiciones de vida medias, ya que poseían mejores servicios que en la alta, pero apreciándose insuficiencia de servicios médicos permanentes, iglesias y liceos (Goyo y Leal, 1988).

Para mejorar el aspecto socioeconómico se inició a través del proyecto de infraestructura social conservacionista La Vega, Caña Brava y Mesa de Caraño la construcción de 10 letrinas de hoyo ventilado tipo MARAVEN (MARNR, 1992a).

3) Estudios legales-normativos

Goyo y Leal (1988) establecieron una propuesta de un Plan Local de Ordenamiento y Manejo de Uso de la Zona Protectora (parte media y alta) de la Cuenca del Río Mucujepe, en el cual indicaron la creación de la misma como Zona Protectora por el Decreto Presidencial N° 557 de fecha 19/11/74 de acuerdo con el Artículo 190 Ordinal 1° de la Constitución Nacional, en concordancia con el Artículo 18 Ordinal 1° de la Ley Forestal de Suelos y Aguas y los Artículos 54 y 191 de su reglamento. El MARNR (1991b) indicó que esta cuenca también fue declarada Reserva Nacional Hidráulica.

Solsona (1990b) realizó un diagnóstico físico-natural y socio-económico, como base para la elaboración del Plan de Ordenamiento y posterior Reglamento de Uso de la Cuenca del Río Mucujepe. Este ordenamiento tuvo como principal objetivo lograr la conservación y protección de dicha cuenca para mantener el régimen hídrico y así garantizar un suministro de agua suficiente a mediano y largo plazo, en calidad y cantidad, para todos los beneficiarios de la cuenca.

Para mejorar las condiciones de la cuenca, el MARNR (1992b) elaboró el Plan de Manejo de la Parte Media y Alta de la Cuenca del Río Mucujepe, estableciendo con éste las acciones, los programas y los lineamientos para contribuir a su recuperación y mantenimiento.

- *Modelos para estimar erosión.*

Morgan (1979), citado por Lizazo (1980), sostiene que la complejidad del sistema erosivo del suelo, con sus múltiples factores interactuando, induce al desarrollo y formulación de modelos conceptuales, los cuales constituyen la más promisoría aproximación al objetivo de disponer de procedimientos predictivos eficientes.

La estimación de la erosión hídrica en las cuencas constituye información básica para resolver problemas de cultivos, suelos, calidad de agua y manejo de cuencas. Existen varios modelos simples y complejos para predecir la erosión hídrica a nivel del suelo, de parcelas, de campo y de cuencas. Estos modelos involucran diversas metodologías, las cuales se han desarrollado con base a factores antrópicos y naturales como son: prácticas culturales, clima, cobertura vegetal y uso de la tierra, suelo y relieve (topografía).

Morgan (1979), citado por Lizazo (1980), divide los modelos para estimar erosión en tres grandes grupos: Físicos, análogos y digitales.

1) **Físicos**: generalmente construidos en laboratorio, necesitan asumir similitud dinámica entre el modelo y el mundo real; 2) **Análogos**: usan sistemas mecánicos o eléctricos, análogos al sistema investigado y 3) **Digitales**: emplean computadoras digitales para procesar grandes cantidades de datos. Dentro de estos modelos se tiene a su vez los modelos determinísticos, los modelos estocásticos y los paramétricos (Lizazo, 1980).

Los **determinísticos** se basan en ecuaciones matemáticas que describen el proceso envuelto en el modelo y lo relacionan con las leyes de conservación de masa y energía. Los **estocásticos** generan secuencias sintéticas de datos, a partir de características estadísticas de muestras de valores disponibles. Los **paramétricos** identifican relaciones estadísticamente significativas, entre variables

que se asumen importantes y, de las cuales existe una cantidad razonable de información (Lizazo, 1980).

Dourojeanni (1975), citado por Lizazo (1980), desde un punto de vista más aplicado divide los modelos de investigación sobre el control de la erosión en tres categorías: 1) Estudios a nivel de cuencas, 2) estudios a nivel de parcela y 3) estudios a nivel de proceso.

Sonneveid (1999) afirma que existen modelos tanto cualitativos como cuantitativos para determinar la erosión hídrica. El modelo *Water Erosion Assessment*, es un modelo cualitativo que calcula la erosión hídrica para diferentes tipos de uso de la tierra, usando para ello clases cualitativas como por ejemplo: alta erosión, moderada erosión, etc.

Entre los modelos cuantitativos que utilizan información promedio sobre suelos, cultivos, pendiente y manejo para un segmento de pendiente, con el objeto de calcular la erosión total laminar y en surcos tenemos: la *Universal Soil Loss Equation (USLE)*, el método *Onstad Foster (AOF)*, y la *Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)*.

Debido a que el suelo puede ser removido tanto por el viento como por el agua, la FAO (1977) señala el desarrollo de modelos para cuantificar los efectos del clima, del suelo y del manejo sobre la erosión eólica como son: el *Erosion Productivity Impact Calculator (EPIC)*, que es un modelo a escala de campo, diseñado para simular la respuesta de sistemas complejos de cultivo al clima, a los suelos y al manejo y conservación de suelos; el *Modelo Simulator for Water Resources in Rural Basins (SWRRB)*, desarrollado para simular la hidrología, el rendimiento de sedimentos y los procesos relacionados en cuencas rurales; el modelo *Simulator for Water Resources in Rural Basins Water Quality (SWRRBWQ)*, que es una versión del modelo SWRRB, diseñado para simular la aplicación y transformación de nutrientes y plaguicidas y, por último, el *Agricultural Non Point Source Pollution Model (AGNPS)* que proporciona estimaciones del volumen total de escurrimiento, tasa máxima de escurrimiento, rendimiento de sedimento, total de nitrógeno (N) y total de fósforo (P).

Forster, Bardos y Southgate (1987) a sabiendas de que la erosión del suelo afecta los intereses económicos de muchos grupos, han desarrollado un modelo en el cual han establecido relaciones numéricas entre costos de tratamiento de agua de las comunidades de Ohio y la erosión del suelo. Sus resultados indican que una reducción anual del 10 % de la pérdida de la erosión de los suelos genera una disminución de un 4% anual de los costos de tratamiento del agua. En comunidades de Ohio la reducción anual por costos de tratamiento de agua alcanza \$ 2,7 millones, con una reducción de erosión de suelos del 25 %.

Los modelos antes señalados han proporcionado una percepción significativa de los procesos de la erosión del suelo; sin embargo, tienen una serie de limitaciones que restringen su utilización, como son: la necesidad de ingresar una gran cantidad de datos, algunos parámetros que son difíciles de medir o estimar y la imprecisión en el ingreso de datos (FAO, 1992).

B) Sistemas de Información Geográfica (SIG).

- Introducción a los SIG.

Esta herramienta, mejorada con eficiencia en la pasada década, permite a los ingenieros, administradores y planificadores evaluar el uso y manejo de la tierra, analizar los escenarios de erosión y desarrollar planes de conservación de acuerdo con las necesidades.

Los SIG constituyen una herramienta sistemática para referir geográficamente una serie de “estratos” de información, a fin de facilitar la sobreposición, cuantificación y síntesis de los datos, así como de orientar las decisiones (OEA, 1993). Los estratos de datos de los SIG pueden considerarse como capas de mapas con referencias espaciales comunes. De este modo, resulta posible realizar análisis de sus características espaciales y temáticas para obtener un mejor conocimiento de la zona.

NCGIA (1990), citado por Castro (1996), define los sistemas de información geográfica (SIG) como un sistema de software, hardware y procedimientos, desarrollados para facilitar la obtención, gestión, manipulación, análisis, modelado, representación y salida de datos espacialmente referenciados, para resolver problemas complejos de planificación y gestión.

Williamson (1992), consultado por Castro (1996), indica que los SIG proporcionan una vía para almacenar considerables cantidades de información definida localmente para una región, acceder y usar los datos almacenados para resolver una multitud de problemas, representar los resultados en forma de tablas y/o mapas, así como mediante la superposición de los mismos.

El uso de los SIG implica una metodología distinta en el marco de la realización de estudios geográficos, ésta se basa en tres puntos principales: la escogencia del software, la selección de las variables y la formulación del modelo para la solución del problema.

- Operaciones y funciones de los SIG (Fallas, 1997).

a.- *Ingreso de datos*, los hace mediante operaciones por medio de las cuales los datos espacialmente referenciados (mapas generales y temáticos y otros materiales) son convertidos a un formato digital utilizando un digitalizador o un escáner. La entrada de datos es un proceso costoso y que consume una gran parte del tiempo requerido para ejecutar un proyecto, las opciones más comunes para la entrada de datos son utilizando el teclado, coordenadas geométricas o mediante la digitalización. Se deben ingresar dos tipos de datos al SIG: referencias geográficas y atributos.

b.- *Administración de datos*. En un SIG se distinguen dos elementos: el elemento geométrico y los atributos que le caracterizan. Por ejemplo, un punto puede representar localizaciones de fauna silvestre y pozos de agua, en cada caso se tiene una o más tablas asociadas a cada uno de estos puntos. Para el caso de la fauna silvestre se puede registrar la especie, el hábitat, la fecha, la hora, el observador y cualquier característica de interés para el observador. Esta información se almacena en una base de datos relacional y que le permite al usuario ligar o asociar esas bases de datos con los elementos geográficos del SIG, permitiéndole al usuario ahorrar tiempo y dinero en la implementación del SIG. También integra nueva información relacionada a las bases de datos originales, en el futuro.

c.- *Análisis de la información.* El análisis es la fase del proceso más interesante y la razón de ser de todo el sistema. El procesamiento y análisis de información espacial es lo que diferencia a un SIG de otros sistemas de información, ya que le permite al usuario visualizar sus datos, derivar nueva información basada en los mapas existentes y en la utilización de modelos matemáticos y/o operadores lógicos. Con el *análisis espacial* se calcula, entre otras cosas, el porcentaje de área de una cuenca con un determinado rango de pendiente. Con el *análisis temporal* compara datos espaciales a través del tiempo. Algunos de estos análisis los efectúa rápidamente, además que la consulta a las bases de datos es bastante rápida.

d.- *Diseño gráfico, composición cartográfica y visualización.* Todo SIG tiene la capacidad de interaccionar con el usuario desde un monitor o mediante la impresión de tablas y mapas. El grado de sofisticación y la calidad de los productos generados está en función del equipo de cómputo, del software y de los periféricos utilizados (impresoras a colores de inyección, monitores de alta resolución, etc.). También de la calidad del papel o material utilizado para realizar las impresiones. Los resultados pueden almacenarse en formato digital (archivos), visualizarse en un monitor, imprimirse o exportarse a otros programas para su posterior procesamiento.

e.- *Generación de productos.* El SIG puede generar una gama muy diversa de productos como mapas, reportes y tablas. Los mapas son quizás los más populares, sin embargo los cuadros y gráficos estadísticos son otra dimensión de este componente SIG. La publicación de mapas electrónicos via Internet es el avance más reciente en el área de la comunicación electrónica.

- *Las seis capas de información particularmente útiles en los SIG para el manejo de peligros naturales son (OEA, 1993):*

- 1.- Estudio de uso de tierras y de suelos.
- 2.- Datos climáticos.
- 3.- Áreas de deslizamientos y principales fallas geológicas.
- 4.- Rasgos naturales (ríos).
- 5.- Características humanas (infraestructura, población).
- 6.- Información topográfica (que proporciona datos de elevación, complejidad del terreno, información sobre cuencas fluviales).

- *Aplicaciones de los SIG.*

Actualmente existen numerosas aplicaciones de los SIG y en diversas disciplinas, debido a las enormes ventajas que ellos proporcionan.

Algunos de los ejemplos de aplicaciones de los SIG en la evaluación de peligros y planificación del desarrollo se tiene que en el Valle Jesús de Otoro, Honduras, en el cual se identificaron áreas planeadas para proyectos de producción agrícola susceptibles a inundaciones y erosión en un 66 %, utilizando los SIG y una escala de 1:60.000. Los datos usados fueron uso actual de la tierra, uso proyectado de la tierra, suelos, asentamientos humanos y llanuras de inundación (OEA, 1993).

Según la OEA (1993), en Santa Lucia, Honduras, a escala 1:10.000, se identificaron uso de la tierra y uso propuesto en conflicto con la capacidad del terreno y/o riesgos de erosión; selección y distribución de lugares para reasentamiento de granjas. Los datos usados fueron asentamientos humanos, capacidad de la tierra, uso actual de la tierra, riesgo de erosión, recursos de agua, zonas de

vida, ecología y estrategia de desarrollo. Resultando que el 99 % de la tierra ocupada por pequeñas granjas fue clasificada como severamente restringida o no adecuada para cultivo. El 2 % de la tierra para agricultura comercial versus el 30 % de la tierra para pequeñas granjas se encontraba afectado por el peligro severo o crítico de erosión.

En Tegucigalpa, capital de Honduras, en 1977 un estudio identificó más de 300 deslizamientos que cubrían una extensión de aproximadamente 1.350 ha, determinándose que 20 % de esa área presentaba una susceptibilidad entre alta y extrema al peligro de deslizamientos de tierra. Ingresando información sobre uso de tierras, susceptibilidad a peligros de deslizamientos, topografía, pendientes, y áreas protegidas, se creó una base de datos SIG para identificar áreas potencialmente adecuadas para la expansión urbana. Se determinó, también, el número de personas que viven en áreas de peligro alto a extremo de deslizamientos, y esta fue la información básica para seleccionar áreas prioritarias donde implementar medidas de prevención (reubicación, construcción, reforzamiento, etc.) (OEA, 1993).

La United Nations Environmental Program (UNEP) (1985), citada por la OEA (1993), destaca algunas aplicaciones potenciales referente a la evaluación y el análisis de los SIG en el manejo de peligros naturales y planificación del desarrollo. De los ejemplos potenciales de la evaluación están 1) considerando la forma del terreno, pendiente, cobertura de vegetación y uso de la tierra y dirección del viento es posible determinar ¿qué área será probablemente afectada si un volcán erupciona? y 2) ¿qué cambios en el clima y en el uso de tierras podrían explicar el proceso actual de desertificación?. Referente al análisis, 1) apoyo a la investigación en casos como ¿qué factores determinan la actividad de deslizamientos en esta área?, ¿qué zonas son susceptibles a deslizamientos de tierra? y 2) evaluación de proyectos, en situaciones como por ejemplo si continúa la tendencia a la erosión, ¿cuál será el impacto económico sobre el proyecto?, ¿cuáles son los costos y beneficios de instaurar o no medidas de control de erosión?.

En un estudio de deslizamientos de tierra, los datos sobre el grado de la pendiente, composición de la roca, hidrología y otros factores, pueden ser combinados con datos de anteriores deslizamientos para determinar las condiciones bajo las cuales pudieran ocurrir nuevos deslizamientos (OEA, 1993).

Otavo y Yanine (1989), citados por Castro (1996), utilizaron un SIG para identificar, evaluar y monitorear la cobertura forestal, vegetación asociada, el uso de la tierra y procesos erosivos de regiones afectadas por la colonización.

Aronoff (1991), citado por Castro (1996), señala que en la Universidad de Oklahoma, EEUU, emplearon un SIG para planificar la conservación del suelo, utilizando para ello el análisis integrado de los tipos de suelo, pendientes, prácticas agrícolas y cultivos desarrollados, con los cuales se predice la erosión del suelo y se logra un enfoque hacia áreas con mayores riesgos de erosión.

Alarcón y Suárez (1991), señalados por Castro (1996), emplearon un SIG para determinar zonas para el manejo sostenido de bosques por el sistema de fajas de aprovechamiento a tala rasa, aplicando modelos ponderativos. Las variables utilizadas en el modelo fueron grado de erosión, fisiografía, pendiente, serie de suelo, vegetación natural y uso de la tierra.

Bastidas de Calderón (1991), citado por Castro (1996), definió un modelo a fin de medir la susceptibilidad de erosión de las diferentes unidades espaciales que conforman una cuenca.

Ceballos (1997), citado por López (1999), evaluó los riesgos de la erosión hídrica y de planificación conservacionista en la Microcuenca Zarzales-La Grande, utilizando para ello las metodologías de la USLE, el Índice de Riesgo de Erosión (IRE) y un SIG.

Castro (1996) determinó cualitativamente las áreas actuales y potenciales susceptibles a erosionarse en la cuenca montañosa Uribante-Caparo, Táchira, combinando las metodologías de la USLE, la FAO y el Índice de Fournier, utilizando un SIG.

Para evaluar el estado de conservación de la cuenca de 1.500 km² que vierte al embalse Joaquín Costa, al NE de España, y proponer medidas de control de la erosión, se desarrolló una metodología de valoración cualitativa y se utilizó un enfoque multiescalar de acuerdo a las fases siguientes: (1) identificación de áreas críticas fuente de sedimentos utilizando información hidrográfica, geológica, litológica y topográfica, (2) evaluación de la cubierta vegetal en esas áreas, (3) cartografía de la erosión y aplicación de modelos de erosión en subcuencas medianas utilizando fotografías aéreas secuenciales y prospecciones semidetalladas de suelos en el campo y (4) propuestas de medidas de conservación en laderas y cursos de agua. Para la elaboración de éste utilizaron un SIG y reconocimiento general de campo (Martínez y Poch, 1998).

www.bdigital.ula.ve

II. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.

2.1. Ubicación del área.

La cuenca del Río Mucujepe se ubica espacialmente en el extremo oeste del Estado Mérida dentro del extenso piedemonte andino lacustre que bordea la Sierra del Norte o de La Culata y las llanuras aluviales del sur del Lago de Maracaibo. Geográficamente está demarcada por las coordenadas UTM: 235.600 m E, 215.675 m E, 945.425 m N, 963.525 m N (zona 19 N). Desde el punto de vista político territorial pertenece a los municipios Alberto Adriani, Sucre y Andrés Bello del Estado Mérida. Tiene una superficie total de 40.500 ha, de la cual fueron estudiadas 17.148 ha, correspondientes a sus partes media y alta.

La Figura 2.1 muestra la ubicación relativa estatal y nacional del área de estudio; la Figura 2.2 ilustra la parte media y alta de la mencionada cuenca y la Figura 2.3 indica una porción del área correspondiente al Parque Nacional Sierra de La Culata, que queda incluida en la parte alta de la cuenca. Esta porción cuenta con una superficie de 1.977,2 ha, valor que en términos relativos representa un 11,5 % de las 17.148 ha evaluadas.

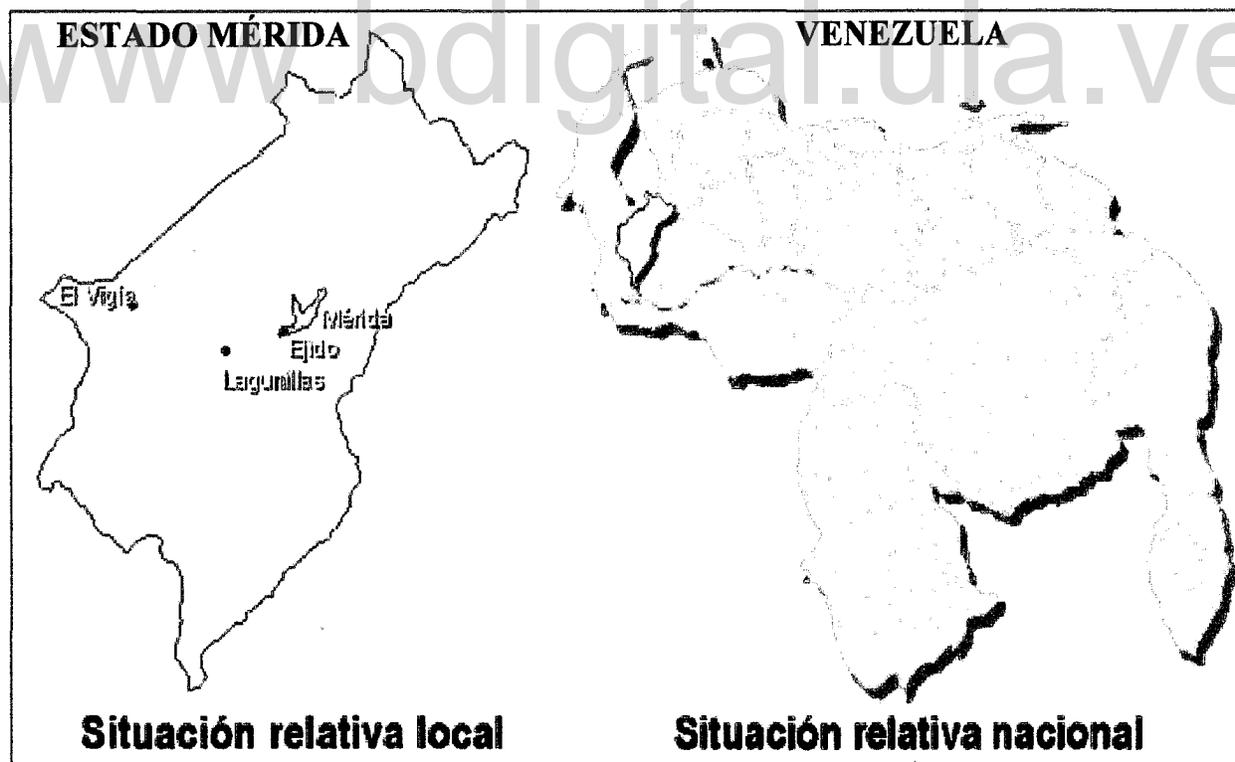


Figura 2.1. Ubicación relativa estatal y nacional del área de estudio.

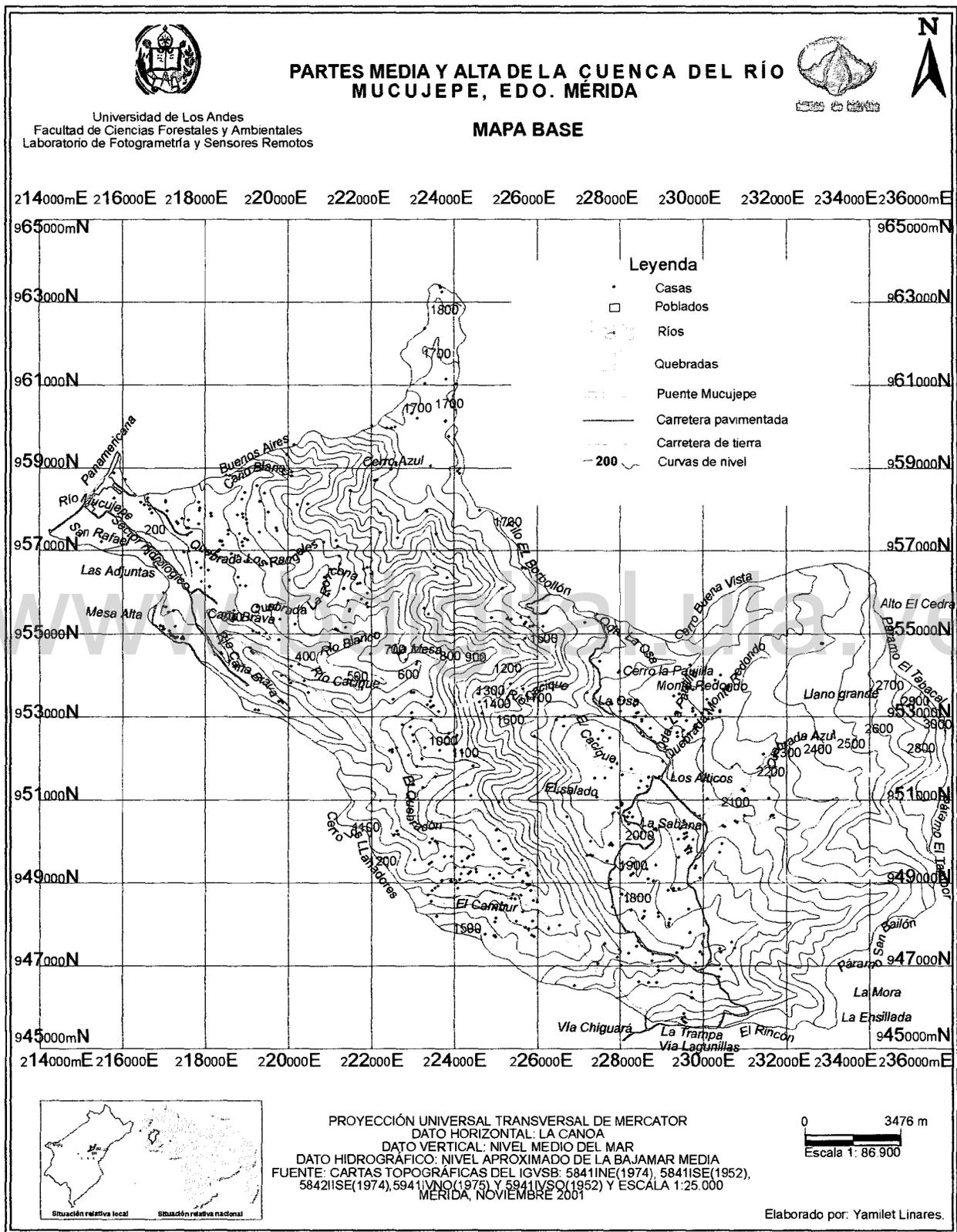


Figura 2.2. Mapa topográfico de la cuenca del Río Mucujepe, Estado Mérida.

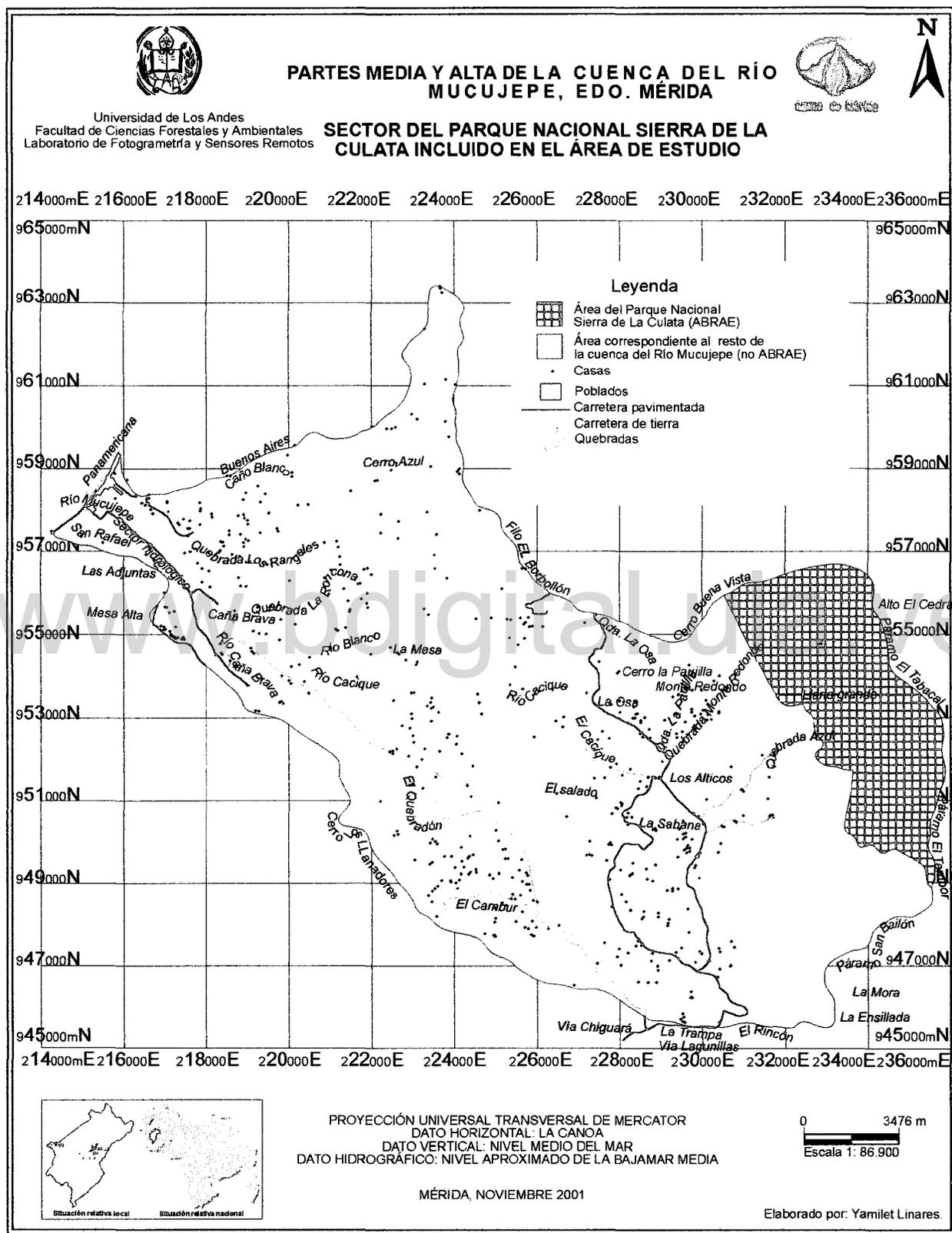


Figura 2.3. Mapa de la cuenca del Río Mucujepe, con la ubicación del sector del Parque Nacional Sierra de la Culata incluido dentro de la cuenca estudiada.

Presenta varias vías de penetración en la cuenca que garantizan su accesibilidad tanto por el norte como por el sur, aunque la mayoría de ellas no están asfaltadas dificultando el acceso en épocas de lluvias. Existe una vía engrazonada que comienza en la Carretera Panamericana, a la altura del poblado Mucujepe, y atraviesa el área en sentido N-S hasta intercomunicarse con los poblados La Trampa, Chiguará y Lagunillas, éstos dos últimos fuera del límite de la cuenca (MARNR, 1982).

2.2. Características físico-naturales.

Orientación

La orientación planimétrica de la cuenca bajo estudio en sus comienzos (Río Cacique) es en dirección NE-SO hasta los 1.900 msnm de altitud, luego cambia su dirección a SE-NO hasta alcanzar la zona plana a una altitud de 134,6 msnm, en la carretera Panamericana, y finalmente continúa desde allí paralela al Río Chama hacia el norte hasta su desembocadura en el Lago de Maracaibo; siendo el aspecto general hacia el O en la parte alta y hacia el NO en la parte media. Por esta razón la cuenca tiene mayoritariamente una posición de umbría, influyendo sobre la vegetación natural y los cultivos. Desde su nacimiento hasta el Lago de Maracaibo el Río Mucujepe cubre en su recorrido un total de 85 km aproximadamente (Solsona, 1990a).

El sistema hidrográfico

El 56 % de los ríos que nacen en la Cordillera de Mérida o Sierra del Norte, como el Mucujepe, forman parte de la hoya del Lago de Maracaibo.

Los límites hidrográficos de la cuenca en cuestión, según el MARNR (1982), son: por el NE, la cuenca del Río Capazón; por el NO, la cuenca del Caño Caimán-Arenoso y cuenca de la Quebrada Caño Seco; por el SE, la cuenca de las quebradas Corrales y Barroso, la cuenca de la Quebrada El Molino y la cuenca de la Quebrada La Sucia; y por el SO, la cuenca del Río Mocacay y la cuenca de la Quebrada La Sucia.

La cuenca del Mucujepe hidrológicamente está conformada por seis microcuencas que son: Caño Blanco (729 ha), Los Rangeles (592 ha), La Roncona (573 ha), Río Blanco (1.733 ha), Cacique (5.827 ha) y Caña Brava (5.938 ha); además esta cuenca presenta un sector hidrológico que tiene una superficie de 1.756 ha. La confluencia de estos ríos forma la cuenca baja del Río Mucujepe, la cual drena por la planicie aluvial hasta su desembocadura en el Lago de Maracaibo (Figura 2.4).

Geología y Litología

El material geológico que aflora en la cuenca del Río Mucujepe pertenece a once unidades lito-estratigráficas tal como se observa en la Figura 2.5. En la Tabla 2.1 se muestra una caracterización de estas once unidades.

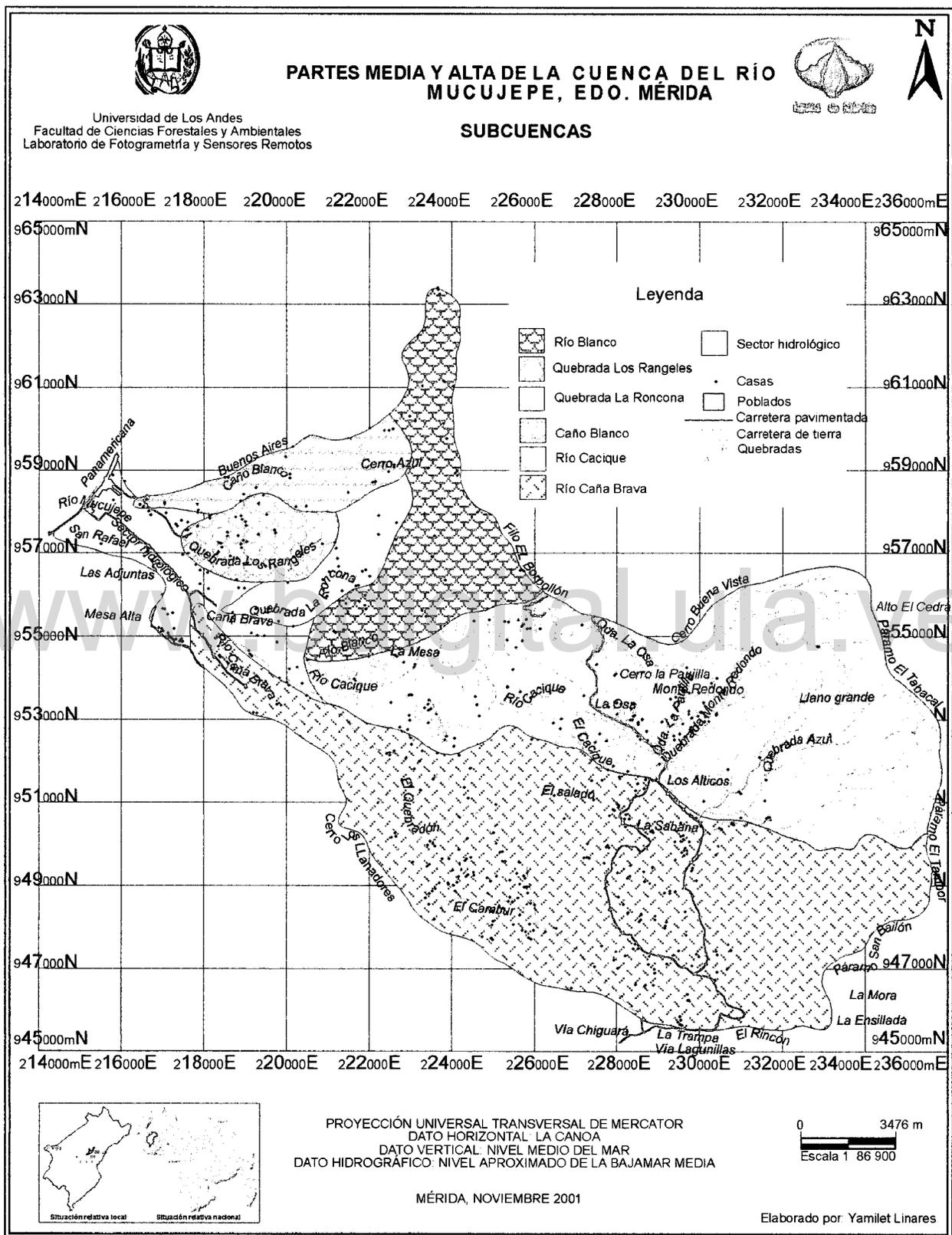


Figura 2.4. Subcuencas de las partes media y alta de la cuenca del Río Mucujepe.

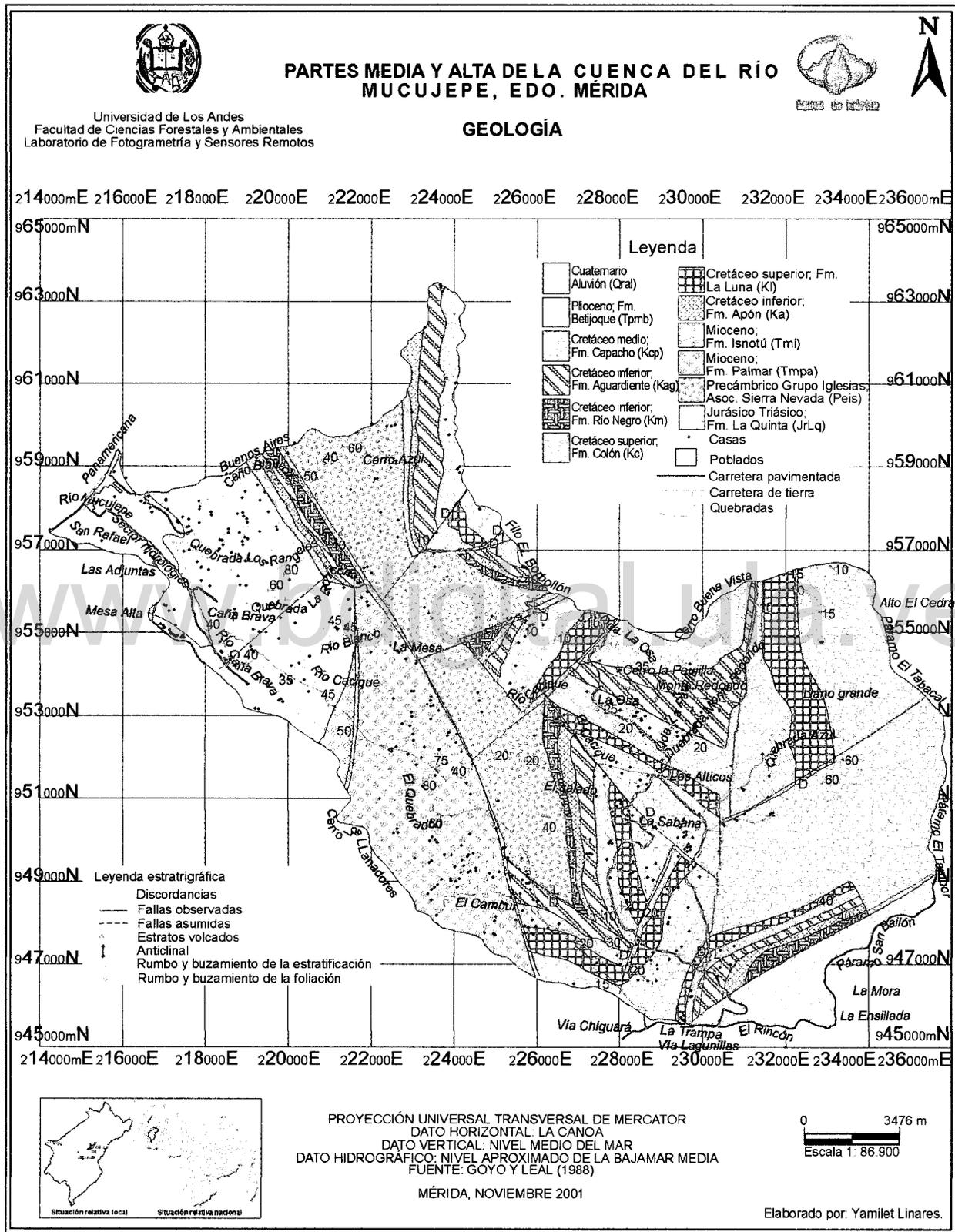


Figura 2.5. Ubicación de las unidades lito-estratigráficas presentes en las partes media y alta de la cuenca del Río Mucujepe.

Tabla 2.1. Caracterización de las unidades lito-estratigráficas presentes en la parte media y alta de la cuenca del Río Mucujepe (MARNR, 1982).

Unidades Lito-estratigráficas	Símbolo	Eras y Edades	Geomorfología	Afloramientos	Litología	Características geotécnicas	Observaciones
Grupo Iglesias. Asoc. Sierra Nevada	Peis	Precámbrico	Vertiente	Vertiente norte de la cuenca desde la parte alta de la Quebrada La Blanca hasta la Quebrada El Quebradón.	Gneises biotíticos y granitos muy alterados	En donde aparece el granito es excelente como material de fundación. En las partes esquistosas se considera moderadamente apto para fundación. En las áreas de afloramientos son frecuentes las zonas de derrumbes, debido a que la parte superior meteorizada no tiene ninguna coherencia.	Representan los sedimentos más antiguos en la cuenca. Por su extensión y presencia, estos materiales son los de segundo orden de importancia.
La Quinta	JrLq	Mesozoico y Jurásico	Vertiente	Aflora camino al Caserío La Trampa y cercano a La Sabana.	Conglomerados (rojos y verdosos), areniscas de grano fino (rojas y verdosas) y lutitas rojas.	Los conglomerados y areniscas se encuentran bien cementados.	Ocupa un sector poco extenso en la cuenca, cuya coloración es rojiza, presentándose derrumbios o deslizamientos en algunos sectores.
Río Negro	Km	Mesozoico y Cretáceo Inferior	Colinas onduladas	La Sabana, Pedregal y El Salado.	Areniscas y conglomerados, ambos de grano grueso.	Los conglomerados son duros y bien cementados. La litología de esta formación es buena como material de fundación.	Representa la parte basal del Cretáceo en los Andes Venezolanos.
Apón	Ka	Mesozoico y Cretáceo Inferior	Colinas onduladas	La Sabana, Pedregal y El Salado.	Calizas grises y lutitas calcáreas.	Excelente como material de fundación. Las calizas son densas, en capas gruesas, con pequeños intervalos lutíticos calcáreos o arenosos.	Forma bandas alargadas.
Aguardiente	Kag	Mesozoico y Cretáceo Inferior	Colinas onduladas	Sector NO de la cuenca, parte alta del Río Blanco, además de los sitios: La Sabana, Pedregal, El Salado.	Areniscas conglomeráticas con intercalaciones de lutitas micáceas.	De excelente a moderado como material de fundación.	Las capas de la formación son potentes, formando paquetes de apreciable espesor.
Capacho	Kcp	Mesozoico y Cretáceo Medio	Colinas	La Sabana, La Osa y en el sector NO de la cuenca.	Lutitas calcáreas bituminosas laminadas, de color gris o negro; calizas compactas fosilíferas y ocasionalmente limolitas.	Las partes inferior y media son pobres como material de fundación, pero la parte superior es de excelente a moderada.	Afloramientos en bandas alargadas.
La Luna	Kl	Mesozoico y Cretáceo Medio	Colinas	Sector NE y SE de la cuenca.	Calizas negras con concreciones, intercaladas con lutitas pizarrosas y calcáreas negras.	Presenta aptitud moderada a pobre como material de fundación.	Afloramientos en bandas alargadas de calizas lenticulares. Presencia de mucha materia orgánica.
Colón	Kc	Mesozoico y Cretáceo Superior	Cumbres de colinas	La Sabana (cuenca alta)	Lutitas no estratificadas de color gris oscuro a negro, localmente piritica y calizas duras, de color gris.	Como material de fundación son pobres.	Considerable extensión. La roca aflora localmente a poca profundidad y existen afloramientos filíticos meteorizados. Las lutitas se meteorizan fácilmente dando

Unidades Lito-estratigráficas	Símbolo	Eras y Edades	Geomorfología	Afloramientos	Litología	Características geotécnicas	Observaciones
							un suelo residual arcilloso, inestable en cortes y taludes. Presencia de fenómenos de solifluxión, por efecto de la saturación en agua del material arcilloso.
Palmar	Tmpa	Cenozoico (Terciario Medio) y Mioceno	Vertientes y colinas	Al SO de la cuenca.	Lutitas gris claro, friables, de grano fino o conglomeráticas, localmente micáceas y carbonáceas. Además, areniscas y arcillas interstratificadas, localmente arenosas, endurecidas y moteadas en rojo y verde oscuro.	Como material de fundación es pobre.	Predominan los suelos arcillosos.
Isnotú	Tmi	Cenozoico (Terciario Medio) y Mioceno	Vertiente	Al SO de la cuenca	Arcillas, areniscas interstratificadas, limolitas y pequeñas cantidades de conglomerados. Las arcillas ocupan el 65 % de la formación, son macizas, arenáceas y poco consolidadas.	Pobre aptitud como material de fundación.	Cubre poca extensión en la cuenca. Los suelos son arcillosos.
Betijoque	Tpmb	Cenozoico (Terciario Superior) y Plioceno.	Colinas y vertientes.	Aflora hacia el O de la cuenca, en contacto con la unidad de terrazas.	Arcillas claras, capas macizas de conglomerados en general, areniscas y limolitas. Los conglomerados son los más sobresalientes y representan el 25 % de esta formación, los cuales son pobremente cementados. Las arcillas constituyen la mayor parte de esta unidad, de color gris verdoso oscuro, generalmente arenosas y carbonáceas.	Pobre aptitud como material de fundación.	Ocupa una extensión considerable.
Conos-Terrazas	Qral	Cuaternario. Acumulaciones aluviales.	Conos de deyección y Terrazas aluviales.	Terrazas: Los materiales afloran al NO de la cuenca.	Conos de deyección: Constituyen unidades de uso muy pequeñas, las cuales presentan suelos muy jóvenes e inestables, sobre los que se observan una dinámica torrencial muy fuerte, evidenciada por la presencia de arrastre de material heterométrico depositado en la confluencia de los ríos. Terrazas: Los depósitos más sobresalientes se encuentran en contacto con la llanura aluvial. Este material dendrítico, transportado y depositado por la dinámica fluvial está compuesto por conglomerados en general, presumiblemente por una mezcla de areniscas, cuarcitas y filitas.		Constituyen los materiales más jóvenes presentes en la cuenca. Se pueden diferenciar 5 niveles en base al grado de evolución del material: Q4 = 300-400 msnm (ubicada sobre el cauce del Río Mucujepe) Q3 = 200-300 msnm Q2 = 170-200 msnm Q1 = 150-170 msnm Q0 = 150 msnm (el Q0 representa el Cuaternario más reciente)

Relieve

La cuenca está comprendida entre los 135 msnm, a la altura de la carretera Panamericana y los 3.000 msnm, en el páramo El Tambor (Figura 2.2). El carácter predominantemente montañoso de la cuenca determina una variedad de relieves y formas, el cual se observa en la Figura 4.16 ilustrada en el Capítulo IV, donde se aprecia la cuenca sectorizada por rangos porcentuales de pendiente.

La geomorfología de la cuenca presenta tres sistemas bien definidos:

a.- Sistema de valle-depresión (intermontano), cuyos valores de pendiente son $< 12 \%$ (relieve plano); forman depósitos de terrazas, conos de deyección y coladas de barro estabilizados, de edad reciente. En la Fotografía 2.1 se puede observar el tope de una terraza del Cuaternario ubicada al noroeste de la cuenca del Río Mucujepe.

b.- Sistema de piedemonte de colinas, con amplio sector de colinas altas y bajas residuales y lomas alargadas desarrolladas, cuyas pendientes promedio están comprendidas entre 12 y 30 %. La Fotografía 2.2 ilustra algunas colinas de rocas sedimentarias al oeste de la subcuenca Caña Brava

c.- Sistema de vertientes o de montaña: Presenta pendientes $> 30 \%$. Conforman un paisaje de montañas altas. La Fotografía 2.3 muestra un sistema montañoso de la parte media de la cuenca del Río Mucujepe.



Fotografía 2.1. Tope de una terraza del Cuaternario ubicada al este del Río Mucujepe (24/09/2000), en las cercanías del poblado Mucujepe.



Fotografía 2.2. Colinas de rocas sedimentarias, al oeste de la subcuenca Caña Brava (24/09/2000), en las cercanías del poblado Mucujepe.



Fotografía 2.3. Sistema de montañas altas localizadas al oeste de la subcuenca Caña Brava (24/09/2000), parte media de la cuenca del Río Mucujepe.

El clima

El clima de una región determina en alto grado el tipo de suelo y de vegetación e influye por lo tanto en la utilización de la tierra. También se encuentra muy relacionada con la topografía de un lugar. Éste resulta del conjunto de condiciones atmosféricas (la precipitación, la temperatura, los vientos, la humedad, la evapotranspiración, etc.) que se presentan en determinada región a lo largo de los años.

Para describir el clima de la partes media y alta de la cuenca del Río Mucujepe, se utilizó la precipitación, la temperatura y los vientos, además, la variable bioclimática zonas de vida producto de la mezcla de varias variables climáticas. A continuación se describen estas variables.

La caracterización de la precipitación y la temperatura de las partes media y alta de la cuenca del Río Mucujepe se realizó tomando en consideración datos de las estaciones climatológicas El Vigía, La Cuchilla y Mucujepe que se presentan en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2. Caracterización de algunas variables climáticas en tres estaciones climatológicas cercanas a la cuenca del Río Mucujepe (MARN, 2000).

Estaciones	Coordenadas geográficas	Serial	Fecha de instalación	Altitud (msnm)	Precipitación promedio anual (mm/año) (1981-1995)	Temperatura (°C/año)		
						Máxima media	Mínima media	Promedio anual (1960-1995)
El Vigía	8° 36' 27"N 71°37'47"W	3035	09/1942	130	1.871	28,2	25,1	27,9
La Cuchilla	8° 38' 00"N 71°21'10"W	3040	06/1963	2.280	1.433	(1973-1983) 19,7	(1973-1983) 10,3	15,6
Mucujepe	8° 38' 53"N 71°34'08"W	3199	03/1980	220	1.864	-	-	-

- Referente a la precipitación, en la Tabla 2.2 se observa que en la medida que la altitud de las estaciones climatológicas se incrementa las precipitaciones decrecen, véase la precipitación promedio anual de las estaciones Mucujepe y La Cuchilla. Por otro lado, en las partes bajas las precipitaciones son abundantes, al producirse lluvias de tipo orográfico formadas por la ascendencia de masas de aire caliente cargadas de humedad que se originan en la lámina del Lago de Maracaibo, y que cuando chocan con las masas de aire fresco de las alturas montañosas originan precipitaciones periódicas, con intensidad muy fuerte, además de un ambiente nublado con gran aporte de humedad ambiental. La distribución y ocurrencia anual de la precipitación es muy irregular. Los dos períodos de máxima precipitación son: marzo-abril y octubre-noviembre; la época de sequía ocurre de diciembre a febrero.

La cuenca del Río Mucujepe se sitúa al sur del Lago de Maracaibo. La vecindad respecto de éste determina la distribución espacial y temporal de las precipitaciones. Existe una disminución de las precipitaciones en sentido N-S (MARNR, 1982).

La precipitación media anual del área en estudio oscila entre 1.200 y 1.900 mm/año, notándose un incremento de la misma en sentido N-S. Este amplio rango de precipitación indica altos niveles de humedad, favorables para permitir el desarrollo de una extensa y densa red hidrográfica.

- La temperatura está fuertemente marcada por las diferencias de altitud y conformación fisiográfica al igual que la precipitación, registrándose la media anual en 27,9 °C (Estación El Vigía) y 15,6 °C (Estación La Cuchilla), tal y como se aprecia en la Tabla 2.2.

Los valores de la temperatura disminuyen rápidamente con la altitud, desde 27 °C en la parte media de la cuenca hasta menos de 14 °C en el sector alto de la misma, la cual también afecta la precipitación y la evaporación (Figura 4.10, ilustrada en el Capítulo IV correspondiente a Resultados y discusión).

- Los vientos dominantes del área en estudio son los alisios que soplan en dirección NE-SO.

- Según los valores de precipitación y temperatura que ocurren en la cuenca del Río Mucujepe y tomando en cuenta la clasificación ecológica de Holdridge, según Ewel y Madriz (1968) citados por MARNR (1982), en el área de estudio se reconocen cuatro zonas de vida (Figura 2.6), a saber:

1) Bosque húmedo tropical (Bh-T)

Se caracteriza por presentar desde un bosque siempre verde denso y alto hasta un bosque ralo, con una gran variedad y densidad en sus especies. Las especies arbóreas más comunes son laurel (*Ocothea sp.*), sangrón, (*Hieronyma oblongata*) trompillo (*Guarea guara*), guamo (*Inga edulis*), malogueto (*Xylopia ligustifolia*), higuierón (*Ficus urbaniana*), caimitón (*Chrysophyllum cainito*), caimito (*Chrysophyllum spp*) y guaimaro (*Couma macrocarpa*).

2) Bosque húmedo premontano (Bh-P)

Este tipo de bosque corresponde a lo que llamarían Pittier y Beard Selva Nublada (MARNR, 1982), la cual se encuentra en áreas de vertientes con pendientes fuertes, cuyos representantes más comunes son las palmas enanas (*Bactris sp.*), helechos arborescentes (*spp.*), mapora (especie más abundante pero no la más dominante) (*Oenocarpos mapora*), caimitón (*Chrysophyllum cainito*), laurel blanco (*Phoebe cinnamomifolia*), yagrumo de montaña (*Cecropia sp.*), etc.

3) Bosque húmedo montano bajo (Bh-Mb)

El bosque presenta árboles que superan los 30 m de altura, con presencia de especies como el pino laso (*Podocarpus rospigliosii*), laurel (*Ocothea sp.*), platanillo (*Heliconia spp.*), algodón (*Alchornea grandiflora*), sai-sai (*Weinmannia spp.*) y laurel paramero (*Beilschmiedia sulcata*).

4) Bosque muy húmedo montano (Bmh-M)

Esta zona bioclimática presenta restricciones altas de uso, debido a las características del clima (temperaturas desde 6 °C hasta 12 °C y precipitaciones alrededor de 1.700 mm/año) y condiciones edáficas. La vegetación paramera predomina en esta zona de vida, la cual se caracteriza por la presencia del frailejón (*Espeletia schultzei* Weed).

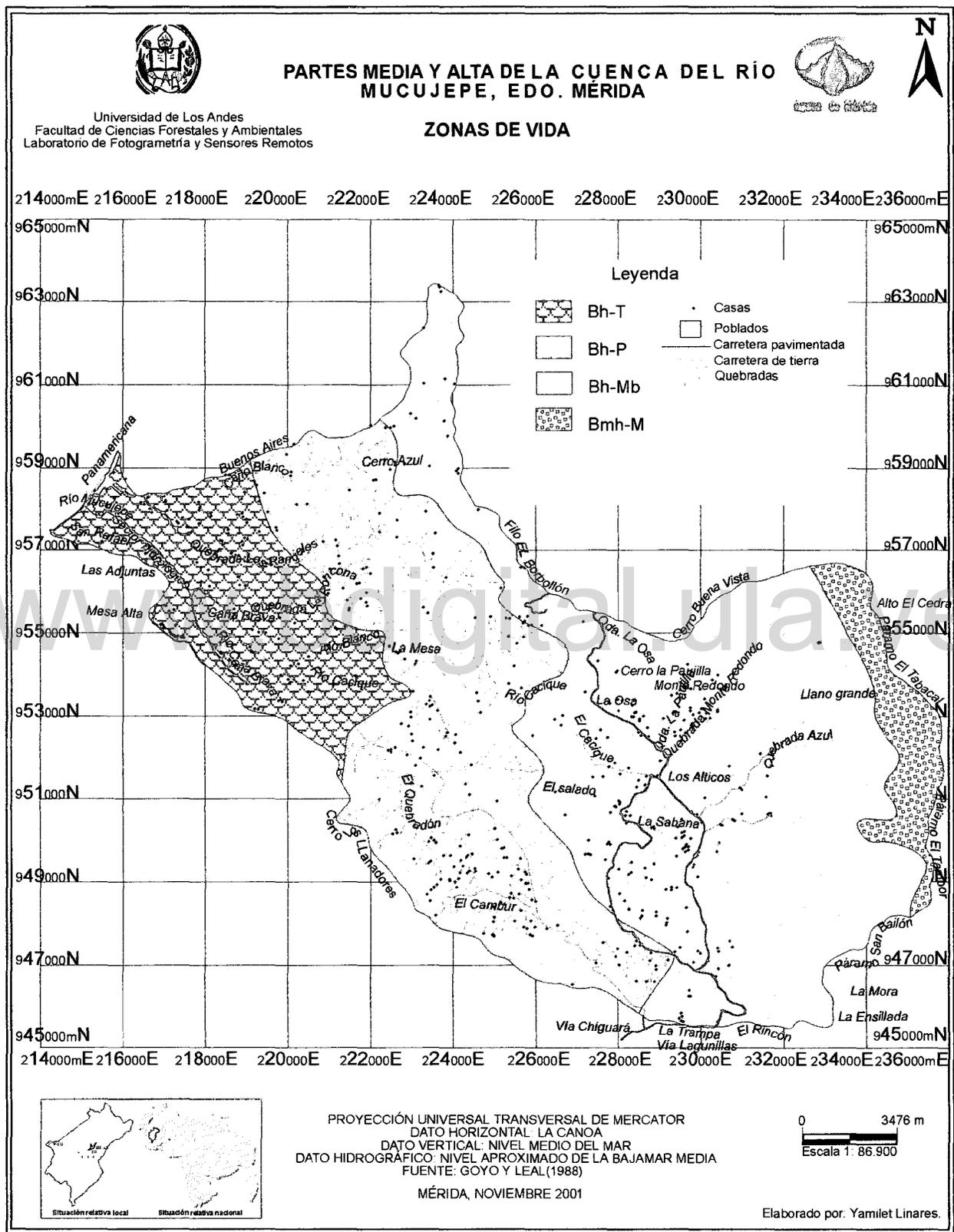


Figura 2.6. Zonas de vida según Holdridge en las partes media y alta de la cuenca del Río Mucujepe.

La precipitación

A continuación se muestra la influencia de la precipitación, bajo diferentes contextos, en la cuenca media y alta del Río Mucujepé.

1) *La precipitación promedio mensual, para 17 años de registro, de las seis estaciones climatológicas consideradas.*

En las seis estaciones climatológicas que están cercanas y alrededor de la cuenca del Río Mucujepé (La Cuchilla, La Azulita, Guayabones, El Vigía, La Palmita y Mucujepé) se observa la tendencia de un régimen bimodal de precipitación media mensual para 17 años de registro (1981-1997), con un pico en el mes de abril y otro en el mes de octubre. El Anexo 2 presenta los valores promedio, tanto mensuales como anuales, de las seis estaciones climatológicas consideradas.

La Estación Mucujepé, particularmente, tiene el primer pico en el mes de abril y el segundo pico en el mes de octubre. La Cuchilla tiene el primer pico en el mes de mayo y el segundo pico en el mes de septiembre.

En el sector medio de la cuenca en estudio se observa una mayor precipitación en los primeros meses del año, contrario a lo que ocurre en la parte alta de la cuenca en la que se detectan valores más altos de precipitación desde mayo hasta septiembre.

En el Gráfico 2.1 se aprecia la bimodalidad tan marcada de las seis estaciones consideradas.

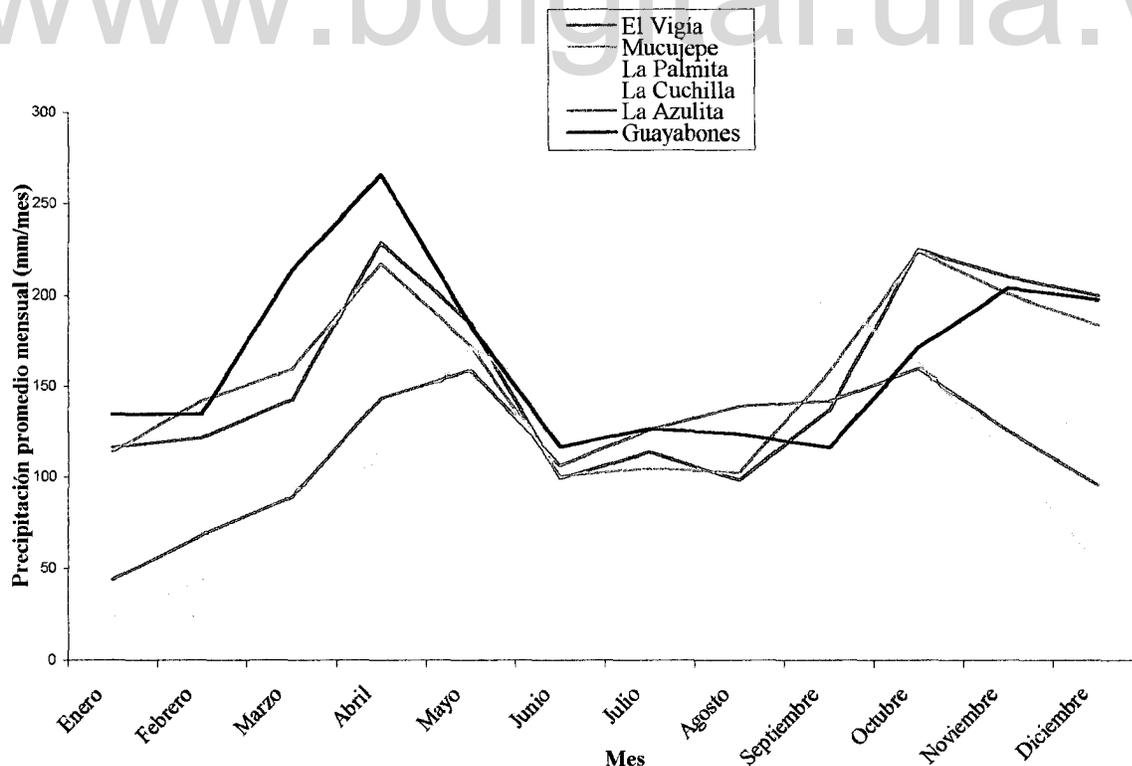


Gráfico 2.1. Valores promedio mensuales de precipitación para 17 años de registro de las 6 estaciones consideradas.

2) *Años y meses secos y húmedos de precipitación anual de las estaciones climatológicas.*

Los valores anuales de precipitación, para 17 años de registro, del año más seco y año más húmedo de las estaciones climatológicas cercanas y alrededor de la cuenca media y alta del Río Mucujepe se presentan en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3. Distribución de los años más húmedos y más secos de las seis estaciones evaluadas.

Años	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97
Estaciones																	
El Vigía										H							S
Mucujepe					H							S					
La Palmita	H												S				
La Cuchilla	H																S
La Azulita	H											S					
Guayabones		H										S					

Nota: La letra H indica un año húmedo y la S un año seco.

A principios de la década de los ochenta ocurrieron años húmedos. El año 1981 fue el año más húmedo, es decir de máxima precipitación para las estaciones La Palmita, La Cuchilla y La Azulita y el año 1982 para la Estación climatológica Guayabones. El año 1985 fue el más húmedo para la Estación Mucujepe (Tabla 2.3).

La sequía es un fenómeno irregularmente distribuido en el área, contrario a los años húmedos, que fueron más regulares. Los años secos ocurrieron a principios de la década de los noventa, especialmente 1992 y 1993. El año 1992 fue el año más seco para la Estación Mucujepe. El año 1997 fue el más seco en la serie de 17 años para las estaciones de El Vigía y La Cuchilla.

Como se indicó anteriormente, 1992 fue el año más seco para la Estación Mucujepe, convirtiéndose enero, para 17 años de registro, en el mes con menor precipitación (13,9 mm/mes). El mes con mayor cantidad de precipitación de ese año fue octubre (217,7 mm/mes) (Gráfico 2.2).

Respecto a la Estación La Cuchilla, 1997 fue el año más seco, el mes de agosto tuvo el menor valor de precipitación con 16 mm/mes y septiembre el que alcanzó el máximo valor de precipitación con 169,1 mm/mes (Gráfico 2.3).

Referente a los meses más húmedos en cada estación climatológica ocurrió lo siguiente: 1985 fue el año más húmedo de la estación Mucujepe, siendo junio el mes con menor cantidad de precipitación en la misma con 58,7 mm/mes, y marzo el mes con mayor cantidad de precipitación durante el año 1985 con 422,6 mm/mes.

En la Estación La Cuchilla 1981 fue el año con más precipitación, enero fue el mes que presentó menor cantidad de lluvia alcanzando 2,2 mm/mes y mayo el mes con mayor cantidad de lluvia logrando 335,3 mm/mes.

A continuación se presentan los gráficos correspondientes a las estaciones más representativas del área de estudio, Mucujepe y La Cuchilla, en lo referente a los valores de los meses más secos y más húmedos.

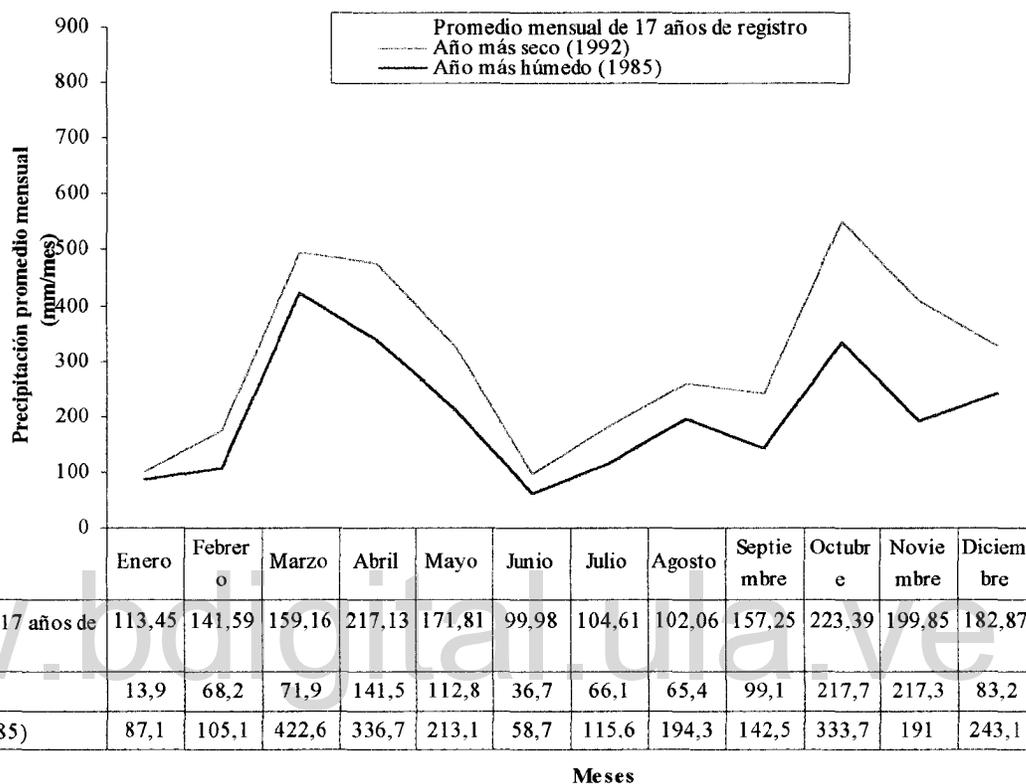


Gráfico 2.2. Año más seco, año más húmedo y promedio mensual de precipitación de la Estación Mucujepe.

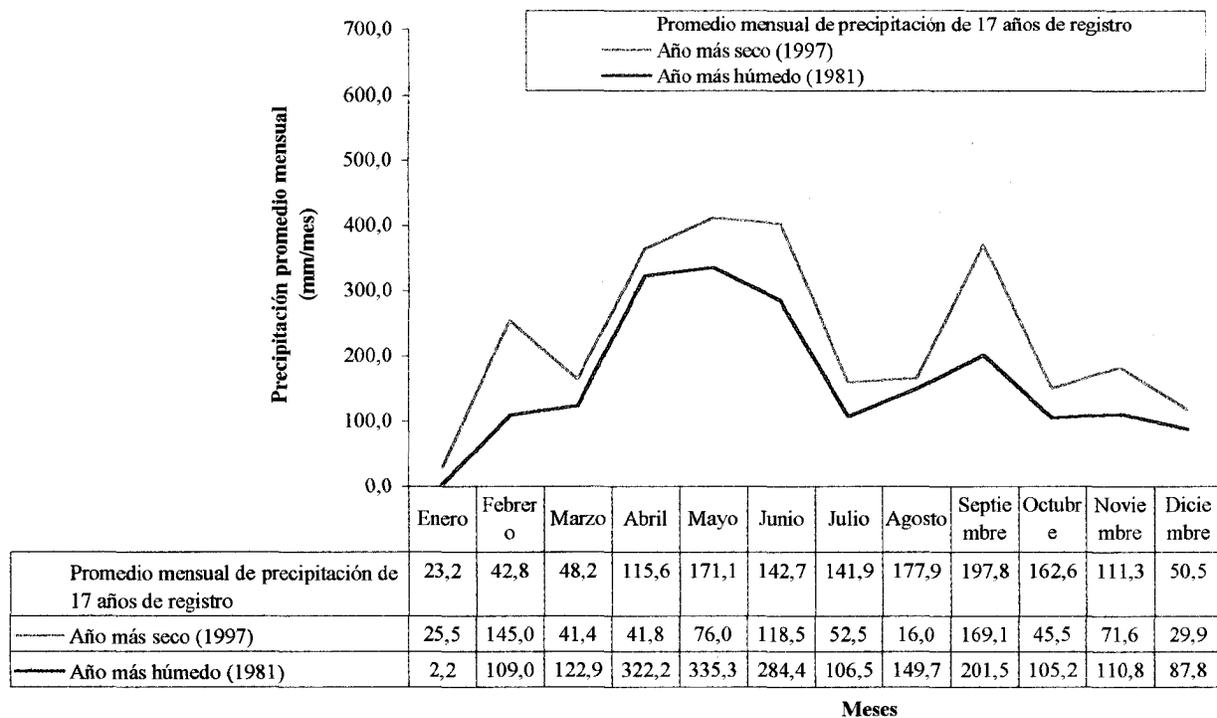


Gráfico 2.3. Año más seco, año más húmedo y promedio mensual de precipitación de la Estación La Cuchilla.

En el Gráfico 2.4 se muestran los valores promedios mensuales de precipitación, para 17 años de registro, de las estaciones climatológicas Mucujepe y La Cuchilla.

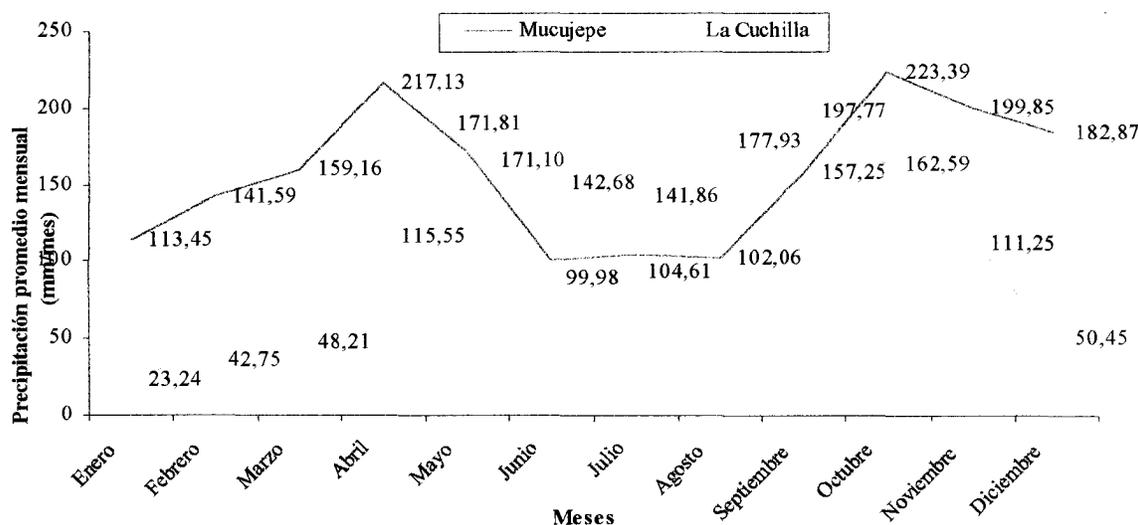


Gráfico 2.4. Precipitación promedio mensual, para 17 años de registro, de las estaciones climatológicas Mucujepe y La Cuchilla.

Los caudales

Los registros de aforos de caudales líquidos son muy importantes ya que revelan en conjunto los efectos de las condiciones actuales que presenta una cuenca.

Se distinguen dos tipos de escorrentías generadoras de caudales. La escorrentías rápidas, que discurren por la superficie del terreno y por tanto llegan a los cauces en poco tiempo; en éstas los volúmenes de agua son los causantes de los caudales punta de las avenidas. Las otras son las escorrentías subsuperficiales y subterráneas que alimentan los cauces de forma lenta y dan como resultados el caudal base que discurre por la red entre tormenta y tormenta (Mintegui, García y Robredo, 1993).

Solsona (1990a) señala que el caudal de estiaje para 1990 en Caña Brava fue de 214 l/seg y en el Río Cacique de 750 l/seg. En 1989 y 1990 en el Río Cacique se generó mayor cantidad de escorrentía que en el Río Caña Brava (Gráfico 2.5). Esto pudiera explicarse por causas hidrogeológicas.

Los caudales máximos se produjeron el 27/03/1990, cuando en Cacique se registraron 5,0267 m³/seg y 4,1574 m³/seg en Caña Brava. El segundo valor de magnitud ocurrió el 15/11/1989, cuando en Cacique se registraron 4,0917 m³/seg y en Caña Brava 2,0855 m³/seg.

El Anexo 6 presenta los datos de los caudales medios diarios medidos en los diques Caña Brava y Cacique, para el período comprendido entre el 09/11/89 y el 27/04/90.

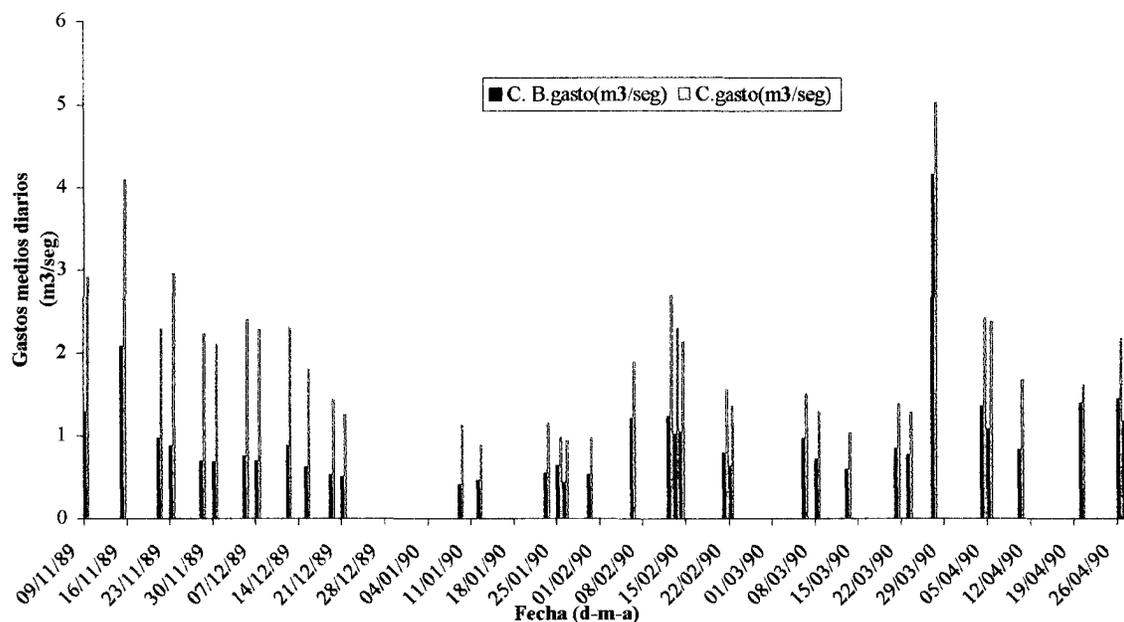


Gráfico 2.5. Caudales medios diarios de Caña Brava y Cacique.

Existe una compleja y directa relación entre el clima, la cobertura vegetal, el suelo y la escorrentía superficial que se produce sobre él. La densidad de la vegetación, el sobre-pastoreo, los incendios forestales, las talas y los cultivos, entre otros, afectan las características físicas de los horizontes superiores del suelo, lo que a su vez, ocasiona modificaciones tanto en la cantidad como en el régimen de la escorrentía (MARNR, 1977).

Los caudales están en relación directa con la cobertura y uso de la tierra. Una cuenca intervenida, es decir, desprovista de suficiente cobertura vegetal, tiene un hidrograma de descarga caracterizado por un pico de caudal elevado en un tiempo reducido; por el contrario, una cuenca con una cobertura vegetal densa que permita la retención e infiltración, tiene mayor capacidad de regulación y por ende los caudales son más bajos y el hidrograma de descarga posee un tiempo de tránsito grande (Ministerio de Hacienda y Crédito Público, 1996).

Las fotografías 2.4 y 2.5 muestran un área cercana al dique toma del Río Caña Brava, donde se observa el tipo y el grado de intervención de la vegetación, y la gran torrencialidad que éste presenta.



Fotografía 2.4. Sección de control de lectura del Río Caña Brava, con vegetación intervenida y de pastizales en sus alrededores.



Fotografía 2.5. Río Caña Brava, aguas arriba del dique toma, donde se evidencia su torrencialidad. A la izquierda del cauce se aprecia vegetación intervenida y a su derecha pastizales puros.

Suelos

En la cuenca existe cuatro tipos de suelos que son: Inceptisoles, Ultisoles, Entisoles, Molisoles, los cuales se ilustran en la Figura 2.7.

La Tabla 2.4 presenta una breve caracterización de las subunidades taxonómicas de los suelos (S-U) presentes en la cuenca en estudio, la cual está más detallada en el Anexo 1.

Tabla 2.4. Breve caracterización de las subunidades taxonómicas de suelos de la parte media y alta de la cuenca del Río Mucujepe (MARNR, 1982).

Ubicación (Altitud: msnm)	S-U	Orden	Clase textural	Tipo de estructura	Materia orgánica (%)	Observaciones
NO (1.200-1.600)	A1	Entisol	FAa	Blocosa subangular	< 3 (Bajo)	Cierta inestabilidad.
SE y NO (Distribuida en casi toda la cuenca)	A2(T-4)	Inceptisol	A	Blocosa subangular	< 3 (Bajo)	Muy inestables. Fácil de ser erosionado.
	A2(T-10)	Inceptisol	Fa	Migajosa	5-8 (Alto)	Susceptible a derrumbes por soliflucción.
	A2(T-)	Ultisol	F	Migajosa	5-8 (Alto)	-
	A2(T-6)	Molisol	FA	Migajosa	5-8 (Alto)	-
E (2.200-2.800)	A3(T-1)	Inceptisol	A	Blocosa subangular	5-8 (Alto)	Susceptible a la erosión.
	A3(T-11)	Ultisol	FA	Blocosa subangular	5-8 (Alto)	-
	A3(T-12)	Ultisol	F	Blocosa subangular	5-8 (Alto)	-
E (2.800-3.000)	B	Ultisol	F	Migajosa	5-8 (Alto)	Es susceptible a la erosión. Estable en su mayor parte e inestable en una mínima.
O (150-400)	C1	Inceptisol	F	Blocosa subangular	3-5 (Medio)	Poca susceptibilidad a la erosión.
	C1	Ultisol	Fa y aF	Blocosa subangular	3-5 (Medio)	-
E (200)	C2	Entisol	Fa	Sin estructura	< 3 (Bajo)	-
O	D1	Inceptisol	A	Migajosa	3-5 (Medio)	Sometida a erosión durante un largo tiempo.
		Ultisol	F	Blocosa subangular	3-5 (Medio)	-

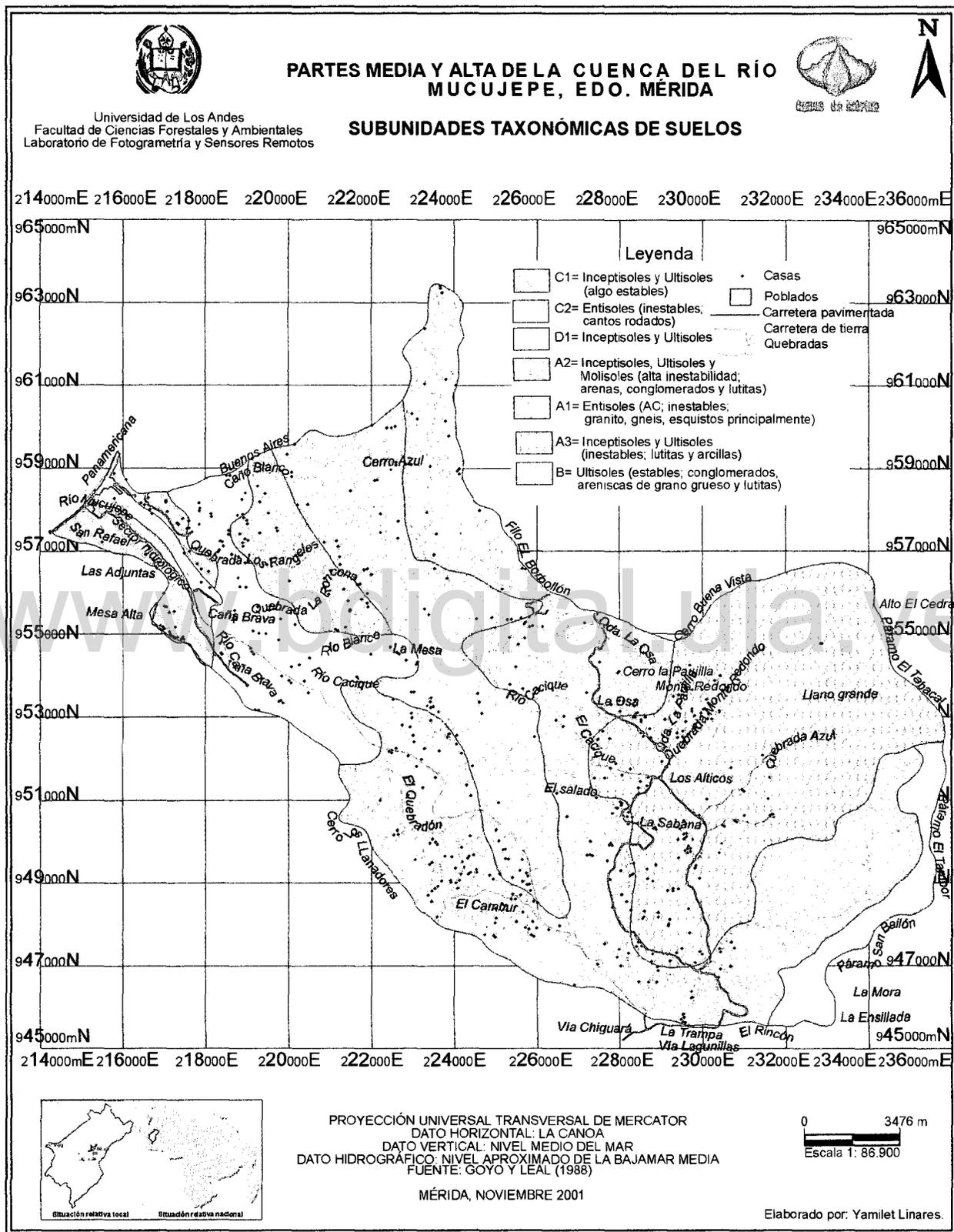


Figura 2.7. Subunidades taxonómicas de suelos presentes en las partes media y alta de la cuenca del Río Mucujepe.

Vegetación y uso actual de la tierra

El mapa que se presenta en la Figura 4.1 muestra los tipos de vegetación y uso actual de la tierra presentes en la cuenca media y alta del Río Mucujepe, correspondiente al año 2001. Su importancia relativa en términos de superficie, agrupando los tipos de vegetación y uso actual de la tierra según sus características, se indican en el Gráfico 2.6. La descripción detallada del mapa de vegetación y uso actual de la tierra se presenta en el Aparte 4.1, del Capítulo IV (Resultados y discusión).

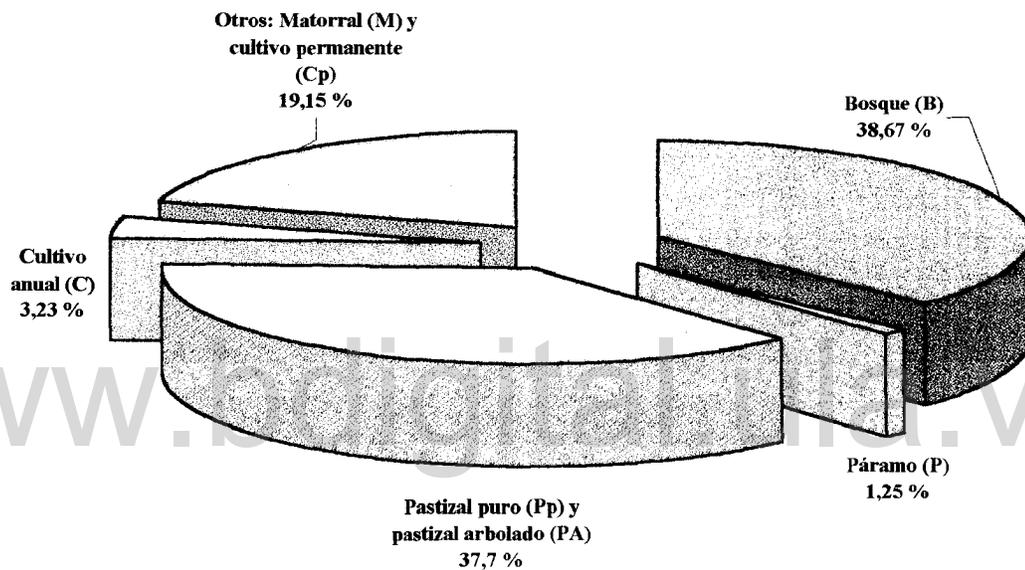


Gráfico 2.6. Tipos de vegetación y uso actual de la tierra agrupados, partes media y alta de la cuenca del Río Mucujepe, año 2001.

3.1. Materiales, equipos y software.

Los materiales, los equipos y los paquetes de software más importantes utilizados en la elaboración de la presente investigación fueron los siguientes:

3.1.1. Materiales.

Material cartográfico: cartas básicas a escala 1:25.000 y 7 mapas temáticos existentes a escala 1:50.000.

Planillas de información climática e hidrológica.

Fotografías aéreas convencionales del área de estudio a escala 1:25.000, años 1996-97, y 1:35.000 del período 1988-89.

Imagen multiespectral HRV de SPOT de 1998.

Útiles de trabajo: Láminas de acetato, lápices, marcadores para acetato, borradores, tirro, libreta para notas, etc.

Juego de cartuchos de tinta para graficador (diferentes colores).

Diskettes de alta densidad de 3½" y discos Zip de 100 y 250 MB.

Papel bond base 20 para impresora y papel para plotter.

Rollos fotográficos de película diapositiva y película negativa.

Herramientas menores (machetes, picos, barrenos, palas).

Reactivos para procesar muestras de suelo: Potasio hidróxido y Tritisol de ácido clorhídrico.

Bolsas plásticas para recolección de muestras de suelo.

3.1.2. Equipos y software.

*Equipos de computación.

*Software Cartalinx, versión 1.0.

*Software IDRISI, versión 3.2.

- *Software TNT MIPS, versión 6.5.
- *Software Free hand, versión 10.0.
- *Dispositivo de entrada (mesa digitalizadora).
- *Dispositivos de salida (impresora, plotter).
- *Estereoscopio de espejos y estereoscopio de bolsillo.
- *Sketchmaster.
- *Cinta métrica.
- Altímetro barométrico.
- Cámara fotográfica (35 mm).
- Brújula Brunton.
- *Receptor manual GPS Magellan Tracker.

Vehículo de doble tracción.

** Pertenecen al Laboratorio de Fotogrametría y Sensores Remotos de la Escuela de Ingeniería Forestal.*

3.2. Metodología.

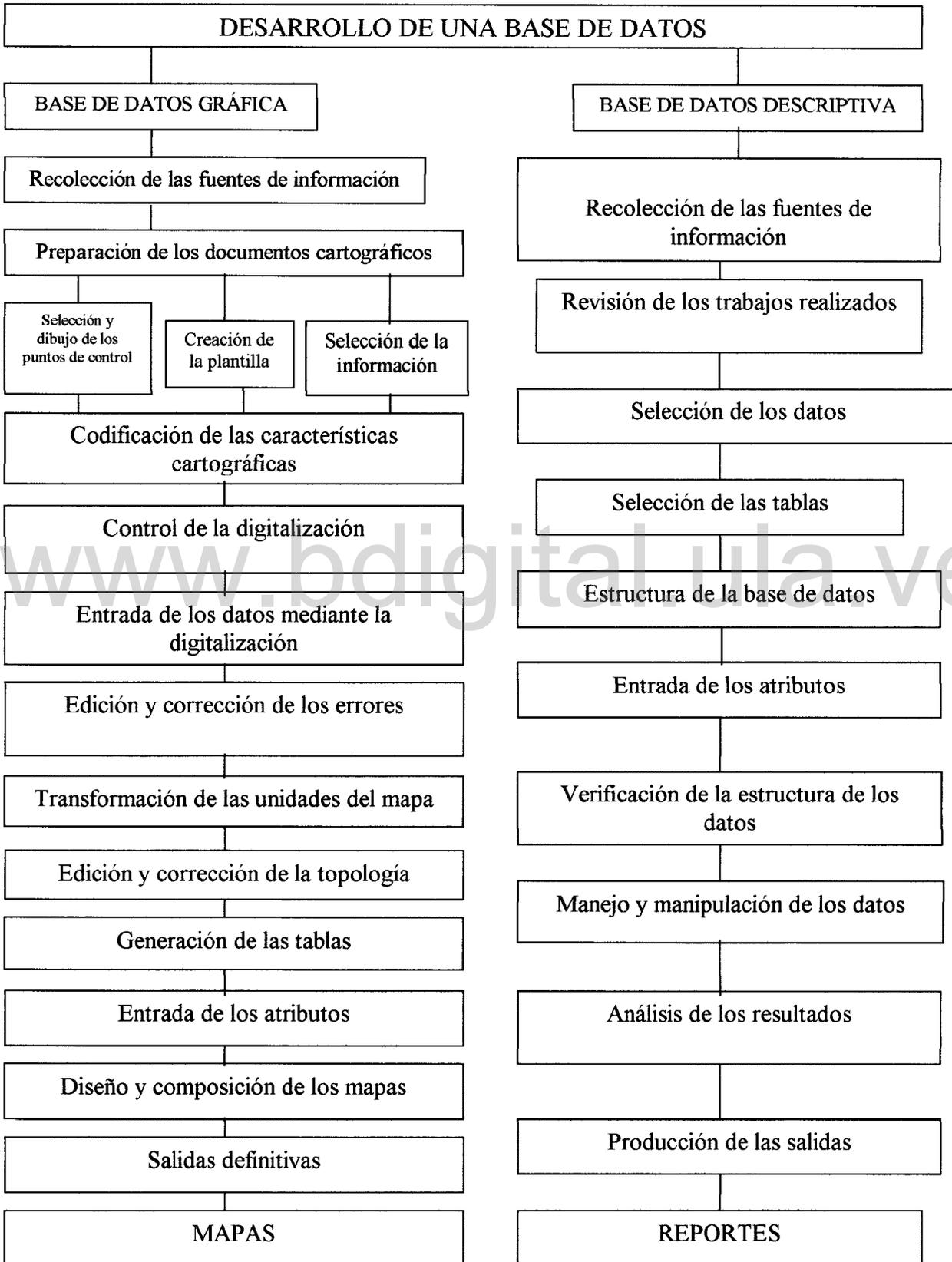
3.2.1. Base de datos y los Sistemas de Información Geográfica (SIG).

Castro (1996) sostiene que una base de datos constituye uno de los elementos más importantes en la constitución de los SIG, ya que alimenta y permite satisfacer las necesidades de información de los usuarios, entre ellas la de organizar la información para ser encontrada rápida y fácilmente en forma total o parcial. Afirma, además, que para establecer su diseño es preciso describir y relacionar los datos espaciales o geográficos con los datos descriptivos o no espaciales.

Para obtener los objetivos planteados en este estudio, en primer lugar, se realizó la composición de una base de datos en el SIG IDRISI utilizando los pasos metodológicos presentados en la Tabla 3.1.

La Tabla 3.1 muestra las etapas contempladas en el desarrollo de una base de datos.

Tabla 3.1. Etapas contenidas en el desarrollo de una base de datos (Castro, 1996).



3.2.2. Desarrollo del modelo matemático de erosión actual y potencial.

3.2.2.1. Consideraciones del modelo matemático de erosión actual y potencial desarrollado e implementado en esta investigación.

- El modelo matemático desarrollado e implementado para determinar la erosión actual y potencial en la cuenca del Río Mucujepe es holístico y está constituido por variables y parámetros ambientales, con suficiente información cualitativa y cuantitativa.
- Las ponderaciones de las variables y parámetros del modelo matemático de erosión actual y potencial se ajustaron según criterios predefinidos por orientaciones de especialista en cada área o campo ambiental, criterios de investigaciones pasadas y con ideas concebidas en este trabajo producto de observaciones directas de campo.
- La aplicación práctica del modelo matemático de erosión actual y potencial dependió de la naturaleza de las operaciones matemáticas concebidas en el mismo, de la cantidad y calidad de los datos de entrada usados y de los programas utilizados para desarrollar cada modelo matemático, factores que pudieran generar errores de diferente naturaleza.
- Las operaciones matemáticas utilizadas en el modelo de erosión actual y potencial, por el hecho de ser sencillas, lo convierten en un modelo simple, el cual puede ser objeto de aplicación e implementación a otras cuencas hidrográficas.
- Pese a que la naturaleza de algunos datos de entrada del modelo matemático de erosión actual y potencial es cuantitativa, como por ejemplo los rangos porcentuales de pendiente, y la de otros es cualitativa, como es el caso de las unidades lito-estratigráficas y de los tipos de vegetación y uso actual de la tierra, la ponderación o asignación de pesos de todos estos datos es netamente de naturaleza cuantitativa.
- La naturaleza de los resultados generados por el modelo matemático de erosión actual y potencial es exclusivamente cualitativa, definida por la presencia o ausencia en el caso de erosión actual, y baja, moderada, alta o muy alta susceptibilidad a la erosión hídrica, en el caso de erosión potencial.
- Las variables y los parámetros ambientales que conforman el modelo de erosión potencial tienen igual peso o ponderación para generar los cuatro componentes ambientales del mismo.

3.2.2.2. Modelización para determinar erosión actual del Río Mucujepe.

A) Conceptualización del modelo matemático de erosión actual.

A continuación se definen algunos términos, antes de iniciar la conceptualización del modelo matemático de erosión actual en la cuenca del Río Mucujepe, citados por García y Amisial (1976), a saber:

Sistema: Combinación de procesos interrelacionados entre sí y que operan como un todo.

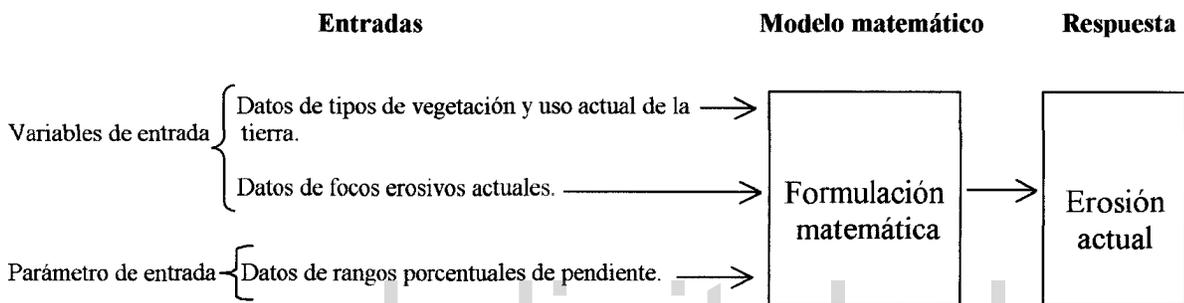
Variable: Característica medible de un sistema que asume diferentes valores numéricos en el tiempo (tipos de vegetación y uso actual de la tierra, precipitación, temperatura, grado de meteorización y zonas de vida).

Parámetro: Característica cuantificable de un sistema que permanece constante en el tiempo (rangos porcentuales de pendiente y tipos de formaciones geológicas).

Modelo: Representación de un sistema.

Modelo matemático: Representación de un sistema a través de ecuaciones, las cuales están unidas por declaraciones lógicas, que expresan la relación entre los parámetros y las variables.

La conceptualización del modelo para determinar la erosión actual es la siguiente:



* *Los datos de los elementos de entrada son datos espaciales.*

A continuación se explica la elaboración de los tres mapas utilizados en la formulación del modelo matemático de erosión actual: 1) vegetación y uso actual de la tierra, 2) rangos porcentuales de pendiente y 3) focos erosivos actuales.

1) Elaboración del mapa de vegetación y uso actual de la tierra de la cuenca del Mucujepe.

Para la elaboración del mapa de vegetación y uso actual de la tierra de la parte media y alta de la cuenca del Río Mucujepe se siguieron los pasos siguientes:

1. Búsqueda y selección de fotografías aéreas. Se utilizaron dos misiones (Tabla 3.2): la misión 010480, tomada entre los años 1987 y 1988, para cubrir aproximadamente el 60 % de la cuenca (parte media-alta y alta) y la misión 010491 de 1996 para cubrir aproximadamente el 40 % de la cuenca (parte media).

Tabla 3.2. Descripción de las fotografías aéreas utilizadas para elaborar el mapa de vegetación y uso actual de la tierra de la parte media y alta de la cuenca del Río Mucujepe.

Escala aproximada	Fecha	Misión	N° de la fotografía (orientación de este a oeste)	Ubicación en la cuenca
1:25.000	26/11/96	010491	359, 358 327, 328, 329 234, 235	Parte media, a nivel del puente Mucujepe. Parte media, en la confluencia Cacique-Caña Brava . Parte media, hacia La Azulita.
1:35.000	28/08/88	010480	3251, 3249, 3247, 3245 3244, 3240, 3238	Parte alta: Del Quebradón hasta La Osa. Parte alta: El Cambur y La Trampa.
1:35.000	28/08/88	010480	3301, 3298 3284, 3288	Parte baja del extremo norte.
1:35.000	10/09/87	010480	411, 409	Parte alta: La Sabana.
1:35.000	10/09/87	010480	1451, 1447, 1445, 1443, 1441	Parte alta: Hacia el límite del Parque Nacional Sierra de La Culata.
1:35.000	10/09/87	010480	1402, 1404	Parte alta: Desde El Rincón hasta el Páramo San Bailón.

2. Fotointerpretación. Se realizó con un estereoscopio de espejos dotado de binoculares 3X. La delimitación fue hecha en la parte central de cada fotografía para reducir los errores causados por los desplazamientos del relieve. Se delimitaron los drenajes, la red vial, los poblados, los tipos de vegetación y uso actual de la tierra y los focos erosivos actuales, así como también se marcaron las viviendas aisladas. La leyenda aplicada a los tipos de uso fue la siguiente:

Bosque medio denso (BMD), Bosque medio ralo (BMr), Bosque bajo denso (BBd), Bosque bajo ralo (BBr), Bosque intervenido (BI), Pastizal puro (Pp), Pastizal arbolado (PA), Matorral (M), Cultivos anuales (C), Cultivos permanentes (Cp) y Páramo (P).

3. Transferencia de la información foto-interpretada al mapa base. Se realizó utilizando un Sketchmaster y el mapa base a escala 1:25.000 del área de estudio.
4. Actualización de la información de las fotografías aéreas. Esta actividad se realizó, en primer lugar, utilizando una imagen multiespectral HRV de SPOT de 1998 en formato digital, la cual fue corregida geométricamente con puntos de control tomados de cartas topográficas a escala 1:25.000 y posteriormente mejorada en su color. Esta imagen digital, desplegada en la pantalla del sistema de procesamiento, fue comparada visualmente con la imagen de las fotografías aéreas. Los cambios apreciados fueron registrados en las fotografías y transferidos al mapa. En segundo lugar, la actualización se completó con comparaciones directas en el campo.
5. Verificación de campo. El mapa preliminar y las fotografías aéreas fueron revisadas en el campo para verificar los límites y la asignación del uso de la tierra. En esta parte del trabajo se utilizó un receptor manual GPS Magellan Tracker con exactitud de 5 m en la determinación de coordenadas planimétricas y 12 m en la determinación de la altitud.
6. El mapa preparado de uso actual de la tierra fue digitalizado con el software Cartalinx, analizado espacialmente en el programa IDRISI, versión 3.2, y diagramado para su presentación final con el software Free hand, versión 10.0 (Figura 4.1).

2) Elaboración del mapa de rangos porcentuales de pendiente de la cuenca del Mucujepe.

La elaboración del mapa de rangos porcentuales de pendiente se realizó a escala 1:25.000, con la digitalización de las curvas de nivel cada 100 m, obtenidas del mapa base, utilizando para ello el software CartaLinx. Seguidamente, dichas curvas de nivel se exportaron al programa IDRISI versión 3.2 donde se generó el modelo digital del terreno (MDT), a partir del cual se elaboró el mapa de rangos porcentuales de pendiente de la cuenca media y alta del Río Mucujepe. Para efecto de esta investigación se consideraron cuatro rangos porcentuales de pendiente cuales son: < 12 %, 12-30 %, 30-50 % y > 50 %. La ilustración de los rangos porcentuales de pendiente se presenta en la Figura 4.2.

3) Elaboración del mapa de focos erosivos actuales de la cuenca del Mucujepe.

La elaboración del mapa de focos erosivos actuales presentes en la cuenca media y alta del Río Mucujepe contó con la información de los focos erosivos actuales localizados en la cuenca, detectados tanto con chequeos de campo como a través de información aportada por fotografías aéreas, vaciada luego al mapa base de escala 1:25.000. Seguidamente este mapa se digitalizó en CartaLinx, se analizó espacialmente en IDRISI y se diagramó en Free hand, versión 10.0 (Figura 4.3).

Obtenidos los tres mapas antes descritos se elaboró el mapa de erosión actual de la cuenca a escala 1:25.000 (Figura 4.4) mediante el modelo matemático de erosión actual.

B) Modelo matemático de erosión actual.

La ecuación matemática que define la erosión actual es la siguiente:

$$EA = \{ (P1 \cap V1) \cap (P2 \cap V2) \cap (FE) \}$$

Donde:

EA = Erosión actual.

P1 = Áreas con pendientes > 50%.

V1 = Áreas donde se presentan los tipos de vegetación: BI, M, PA, Pp, Cp, C, BMr y BBr.

P2 = Áreas con pendientes entre 30-50 %.

V2 = Áreas con cultivos anuales.

FE = Áreas con focos erosivos actuales.

Al producto de las operaciones incluidas en el primer paréntesis del modelo se le denominó *factor A*, al producto de las operaciones del segundo paréntesis, *factor B*, y al del tercero, *factor C*. La superposición espacial en IDRISI de estas tres condiciones (factores A, B y C), generó el mapa de erosión actual, el cual presenta la localización de la áreas con y sin erosión actual correspondientes a las partes media y alta de la cuenca del Mucujepe.

A

B

C

$$EA = \{ (p > 50\% \cap \&tveg) \cap (p30 - 50\% \cap C) \cap (FE) \}$$

3.2.2.3. Modelización para determinar erosión potencial del Río Mucujupe.

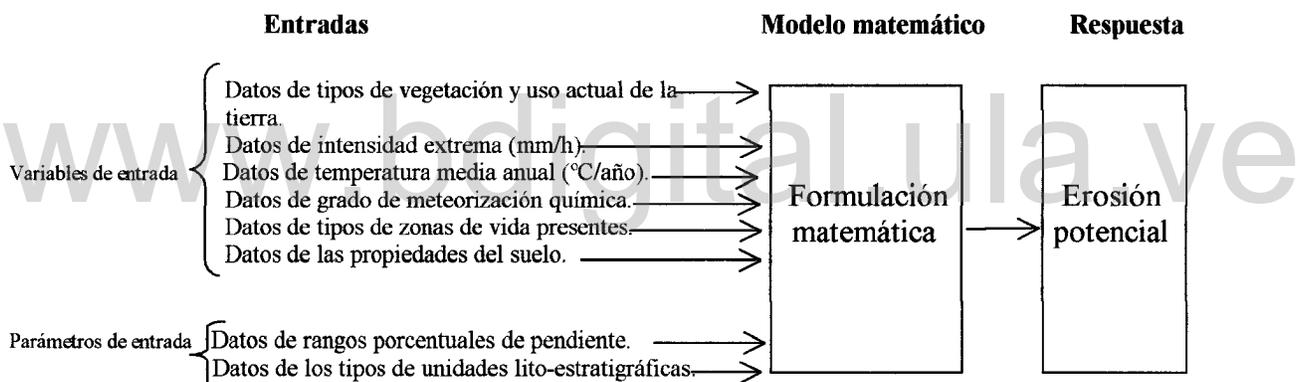
Páez (1994), citado por López (1999), define el *riesgo de erosión o erosión potencial* como la máxima pérdida de suelo posible en ausencia de cobertura vegetal y prácticas conservacionistas, es decir, considerando solamente la interacción de los factores físicos de la tierra: suelo, clima y topografía.

El Ministerio de Hacienda y Crédito Público (1996) define la *vulnerabilidad* como la predisposición intrínseca o susceptibilidad de un elemento o grupo de elementos a ser afectados por la probable ocurrencia de un evento desastroso. En otras palabras, es el grado de amenaza en relación con su capacidad o inhabilidad para afrontar o soportar la acción de un evento posible.

En la modelización de la erosión potencial para determinar las fuentes potenciales productoras de erosión de la cuenca media y alta del Río Mucujupe se siguieron los pasos dados a continuación:

A) Conceptualización del modelo matemático de erosión potencial.

El modelo potencial desarrollado e implementado se conceptualizó de la manera siguiente:



La escala utilizada para dar pesos o ponderaciones a todos los productos cartográficos o mapas que conforman el modelo matemático de erosión potencial es de uno a cuatro, representando el uno baja susceptibilidad a la erosión hídrica y cuatro muy alta susceptibilidad.

Para la determinación del modelo de erosión potencial se consideró necesario agrupar los elementos constitutivos en componentes según su naturaleza. Los componentes ambientales resumen en forma sintética e interrelacionada todas las características ambientales a considerar en una cuenca para conformar una condición integral de la misma, expresada en la forma de fisiografía, bioclima, suelo y utilización de la tierra. El siguiente modelo matemático especifica los cuatro componentes ambientales y la agrupación de los elementos utilizados en cada uno de éstos:

Componentes considerados en el modelo de erosión potencial:

$$ISE = \frac{CF + CS + CMB + CUT}{4}$$

Donde:

ISE = Índice de la susceptibilidad del suelo a la erosión hídrica o erosión potencial.

CF = Componente fisiográfico: { Componente geológico (Unidades lito-estratigráficas y litología dominante) y Rangos porcentuales de pendiente

CS = Componente suelo: Propiedades: { Clase textural, Tipo de estructura, Porcentaje de materia orgánica y Permeabilidad

CMB = Componente morfobioclimático: { Precipitación, Temperatura, Zonas de vida según Holdridge y Grado de meteorización química

CUT = Componente de utilización de la tierra: { Tipos de vegetación y uso actual de la tierra.

La Figura 3.1 esquematiza el desarrollo metodológico del modelo matemático de erosión potencial desarrollado en esta investigación para determinar el riesgo a la erosión hídrica o erosión potencial en las partes media y alta de la cuenca del Río Mucujepe.

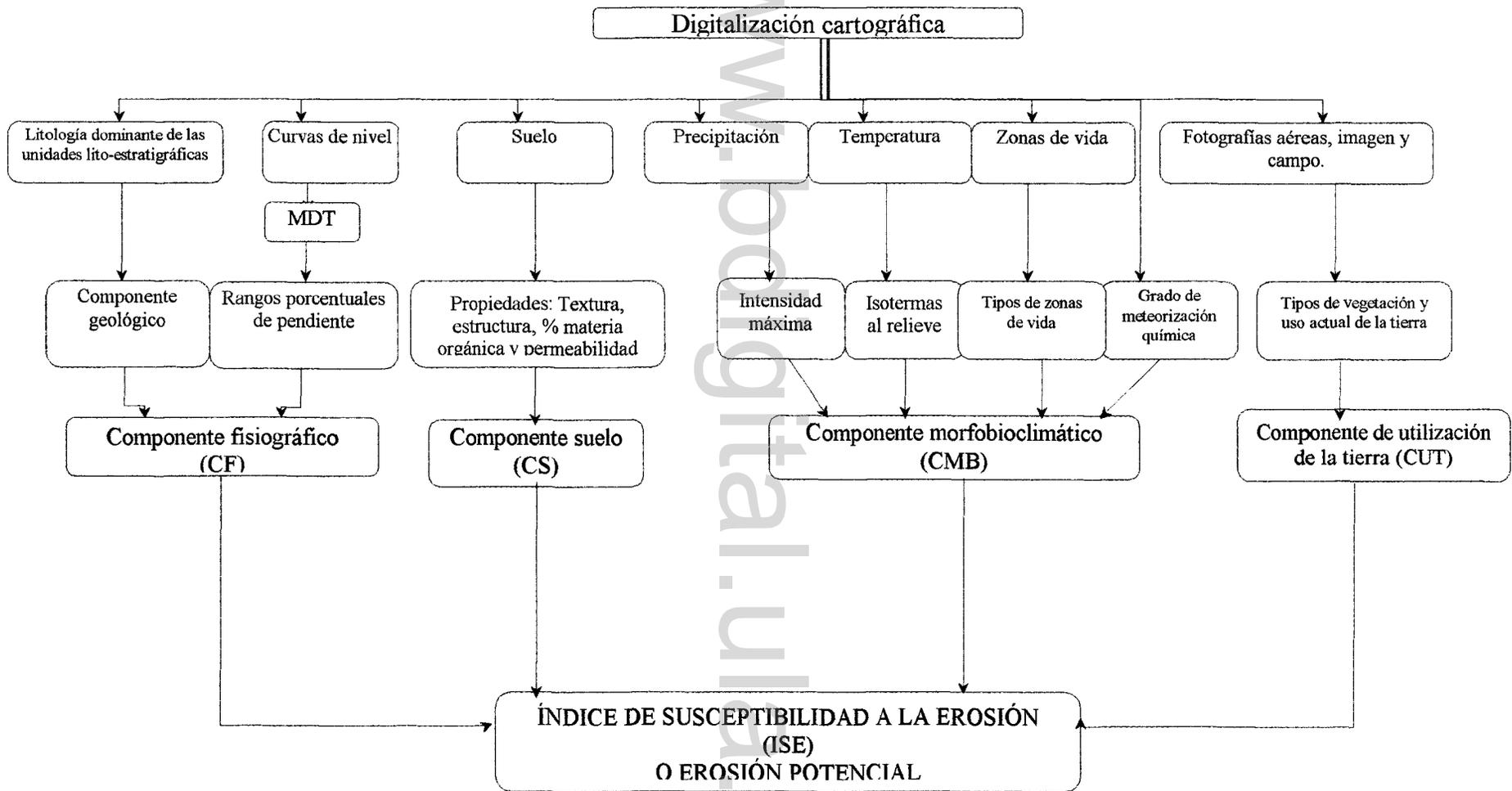


Figura 3.1. Esquemización del desarrollo metodológico del modelo de erosión potencial diseñado en el presente estudio.

B) Asignación de pesos a los cuatro componentes del modelo de erosión potencial.

b.1. Componente fisiográfico.

El componente fisiográfico está conformado por el componente geológico y los rangos de pendiente. El componente geológico a su vez incluye el nombre y edad de cada unidad lito-estratigráfica y la litología con las rocas más características de las mismas. Los rangos de pendiente, segundo elemento constituyente del componente fisiográfico, están expresados en porcentajes.

Componente geológico

La naturaleza de la roca madre y su resistencia a la erosión constituye un elemento clave en la génesis del proceso erosivo y torrencial (CIDIAT, 1984).

A partir de la información sobre las rocas dominantes en cada unidad lito-estratigráfica y con la orientación de especialistas se realizó la asignación de calificaciones del grado de susceptibilidad a la erosión hídrica de este parámetro, obteniéndose con ello el componente geológico ponderado de la cuenca (CG) (véase Figura 4.5).

En la Tabla 3.3 se muestra los pesos asignados a la litología dominante y a cada unidad lito-estratigráfica presente en la parte media y alta de la cuenca del Mucujepe.

El valor de 1 se le asignó a la unidad lito-estratigráfica, considerada por especialistas en el campo geológico, como la menos susceptible a erosionarse desde el punto de vista hídrico; la calificación de 2 y 3 como las que presentan moderada y alta susceptibilidad a erosionarse y la calificación de 4 a la unidad lito-estratigráfica más susceptible a erosionarse en lo que a geología se refiere.

Tabla 3.3. Asignación de pesos de las unidades lito-estratigráficas presentes en la parte media y alta del Río Mucujepe.

Edad/Unidad lito-estratigráfica	Litología dominante de cada unidad lito-estratigráfica	Susceptibilidad a la erosión hídrica
Precámbrico/Asoc. Sierra Nevada	Gneis (1), esquistos (1) y granitos (1).	1
Triásico-Jurásico/La Quinta	Areniscas rojas (2), lutitas rojas (4) y conglomerados (2).	2
Terciario/Río Negro	Areniscas (1) y conglomerados (2).	1
Cretácico/Apón	Calizas (1) y lutitas (2).	1
Terciario/Aguardiente	Areniscas (1) y lutitas negras (2).	2
Cretácico/Capacho	Lutitas negras (3) y calizas (1).	2
Cretácico/La Luna	Calizas negras (1) y lutitas negras (2).	2
Cretácico/Colón	Lutitas negras (4) y calizas (1).	4
Terciario/Palmar	Areniscas (2) y lutitas blancas (3).	3
Terciario/Isnotú	Arcillas (3), areniscas (2) y limolitas (3).	3
Terciario/Betijoque	Arcillas claras (3) y conglomerados (2).	3
Cuaternario/Terrazas-Conos	Conglomerados en general (2), areniscas (2), cuarcitas (2) y filitas (2).	2

Rangos porcentuales de pendiente

Además de la longitud y la forma del terreno, una de las principales características que afectan el proceso erosivo es la pendiente, porque a mayor pendiente mayor movimiento de partículas de suelo por efecto de salpicadura, además de que habrá mayor velocidad de escurrimiento y por lo tanto mayor erosión (Barrios, 1997).

El mapa de rangos porcentuales de pendiente (P), Figura 4.2, se ponderó bajo el criterio de que a mayor pendiente, mayor su susceptibilidad a la erosión hídrica. Se elaboró el mapa ponderado de pendiente en base a cuatro magnitudes de susceptibilidad a la erosión hídrica (baja, moderada, alta y muy alta susceptibilidad a la erosión). La Tabla 3.4 presenta la calificación asignada a los cuatro rangos porcentuales de pendiente establecidos para determinar la erosión potencial de la parte media y alta del Mucujepe .

Tabla 3.4. Asignación de pesos a los rangos porcentuales de pendiente en la parte media y alta del Río Mucujepe.

Rangos porcentuales de pendiente (%)	Susceptibilidad a la erosión hídrica
1 = < 12	1
2 = 12-30	2
3 = 30-50	3
4 = > 50	4

Obtenida la ponderación de los componentes CG y P, el promedio aritmético de los mismos generó el componente fisiográfico ponderado (CF) de la parte media y alta de la cuenca del Mucujepe, el cual presenta cuatro magnitudes de la susceptibilidad a la erosión hídrica (Figura 4.6).

La ecuación matemática que definió el componente fisiográfico fue:

$$CF = \frac{CG + P}{2}$$

Donde:

CG = Componente geológico

P = Cuatro rangos porcentuales de pendiente.

En la superposición espacial con IDRISI de los parámetros ambientales ponderados (CG y P) que forman el componente fisiográfico, hubo situaciones en que resultaron de esas superposiciones valores enteros y casos con valores reales. A estos últimos casos se les realizó una aproximación por exceso al valor real resultante. Este criterio fue aplicado para los tres componentes siguientes, es decir, el componente suelo, el componente morfobioclimático y el componente de utilización de la tierra.