

b.2. Componente suelo.

La determinación de la susceptibilidad relativa de los suelos a la erosión permite clasificar los terrenos en grupos de resistencia natural similares (Suárez, 1980). La *erosionabilidad del suelo* se refiere a la vulnerabilidad o susceptibilidad del suelo a la erosión, contrario a la resistencia del mismo (Barrios, 1997).

La erosionabilidad, según Barrios (1997), depende de seis propiedades del suelo, estas son:

a) Textura: A texturas más francas, mayor infiltración. Un suelo arenoso tiene mayor tamaño de poros y por tanto infiltración más rápida, lo que produce menor escurrimiento y menos erosión. Tiene poca arcilla, lo que le permite baja estabilidad y facilita su arrastre. Un suelo arcilloso, tiene menor tamaño de poros y por ende lenta infiltración, mayor escurrimiento y más erosión. Tiene mucha arcilla lo que le da más estabilidad, dificultando su arrastre. En el terreno se producen infinitas combinaciones entre estas interrelaciones básicas que determinan el grado de erosionabilidad del suelo (Barrios, 1997).

b) Grado de agregación de las partículas: Depende del contenido de materia orgánica, de la estructura y de la permeabilidad (Barrios, 1997).

c) Estabilidad del agregado ante el agua. Esta propiedad según Porta, López y Roquero (1999) se refiere a la capacidad que tienen los agregados de mantener su forma al ser sometidos a fuerzas inducidas artificialmente, en concreto las derivadas de la humectación, el impacto de las gotas de lluvia o el paso de agua a un determinado proceso dispersivo. Depende de la estructura, la cual determina la distribución del tamaño de poros y por ello los procesos de transferencia, y del laboreo, el cual representa una alteración importante que provoca una fragmentación.

d) Humedad inicial. Al iniciarse una lluvia, un riego o llegar una corriente de agua sobre el suelo seco, la entrada tendría lugar en condiciones no saturadas, pero llegará un momento en que el suelo no será capaz de infiltrar toda el agua que recibe. El exceso de agua si se trata de una ladera se movilizará a favor de la pendiente, dando lugar a la escorrentía superficial y por consiguiente a la erosión (Porta, López y Roquero, 1999).

e) Pedregosidad: Un estrato rocoso debajo del Horizonte A puede dar origen a surcos pero no a cárcavas (Barrios, 1997).

f) Profundidad del perfil del suelo. Según Porta, López y Roquero (1999), la profundidad del suelo determina la profundidad de enraizamiento, la disponibilidad de agua y nutrientes y la aptitud del suelo para el crecimiento de las plantas.

Pese a que la erosionabilidad del suelo depende de varias propiedades, para efecto de este trabajo de investigación la susceptibilidad del suelo a la erosión se basa en las condiciones físicas y químicas heredadas a partir del respectivo material de origen de los mismos como son: clase textural, tipo de estructura, contenido de materia orgánica y régimen de permeabilidad.

Las seis subunidades taxonómicas que conforman el mapa de suelos (véase, Figura 2.7 y Anexo 1), fueron ponderadas considerando los primeros 20 cm de profundidad de cada perfil de suelo, es decir,

lo que corresponde con el Horizonte A del mismo y evaluando las siguientes propiedades de los suelos:

- Clase textural (t),
- Tipo de estructura (e),
- Cantidad de materia orgánica (mo) y
- Permeabilidad (p).

La ecuación matemática que define el componente suelo es:

$$CS = \frac{t + e + mo + p}{4}$$

El promedio aritmético de estas cuatro propiedades, previamente ponderadas con calificaciones o pesos desde 1 (baja susceptibilidad a la erosión hídrica) hasta 4 (muy alta susceptibilidad a la erosión hídrica), dio como resultado un mapa del componente suelo ponderado de la cuenca media y alta del Mucujepe (Figura 4.7), con cuatro calificaciones o magnitudes de susceptibilidad a la erosión de los mismos.

Los cuatro parámetros utilizados para trabajar el componente suelo en esta investigación fueron variables usadas para calcular la erosionabilidad del suelo (K) en la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE). A continuación se explica la asignación de pesos de la susceptibilidad del suelo a la erosión de cada uno de ellos.

Clase textural: Este término describe la proporción relativa de las distintas partículas minerales de arena (a), limo (l) y arcilla (A) que conforman la masa del suelo. Algunos autores hablan de textura para describir la sensación que tiene el prospector al hacer deslizar entre sus dedos una muestra húmeda de suelo; en tal sentido, la textura es sinónimo de clase textural (Porta, López y Roquero, 1999).

La clase textural o textura además de ser una de las características más estables a evaluar en los suelos, es también muy importante puesto que permite inferir otras propiedades y características relacionadas con el uso y comportamiento del suelo, entre las que caben señalar el riesgo de erosión hídrica, el riesgo de erosión eólica y la facilidad para la circulación del agua.

La distribución del tamaño de las partículas es uno de los más importantes determinantes de la susceptibilidad o resistencia de un suelo a la erosión. La erodabilidad del suelo tiende a aumentar con un mayor contenido de limo y a disminuir con un mayor contenido de arena, arcilla y materia orgánica (Wischmeier y Mannering, 1965, citados por Suárez, 1980).

Los elementos gruesos, como el caso de las arenas, presentan poca actividad, su superficie específica es baja y suelen ser más resistentes a la meteorización química que a la física (Porta, López y Roquero, 1999). Los suelos de textura arenosa por poseer espacios porales grandes, son generalmente permeables al aire, agua y raíces, característica que los hace absorber toda el agua que recibe sin originar corrientes superficiales y en consecuencia no sufrir erosión, además su gran tamaño y peso hace más difícil su arrastre. Sin embargo, normalmente tienen ciertas limitaciones tal

como la baja capacidad de retener agua para las plantas y la otra limitante es que son suelos con baja capacidad de suministro de nutrimentos (Casanova, 1996).

Según Porta, López y Roquero (1999) los suelos cuya fracción predominante es el limo (limosos y franco-limosos) además de tener una inestabilidad estructural alta y una permeabilidad de media a baja, presentan una erosionabilidad alta, lo que los hace muy susceptibles a erosionarse.

Suárez (1980) afirma que los suelos arcillosos por tener espacios porales muy pequeños durante una lluvia normal, gran parte del agua no penetra en el terreno sino que corre superficialmente hacia drenajes, teniendo gran capacidad retentiva de las aguas que penetran y mayor resistencia a la acción desintegradora de las corrientes superficiales. Además, poseen baja permeabilidad y las posibilidades de pérdidas de nutrimentos por lavado son mucho menores que en el caso de los suelos arenosos.

Las arcillas, conjuntamente con la materia orgánica, aumentan la capacidad de los suelos para retener agua y nutrimentos, mientras que las partículas más grandes (arenas y limos) sirven como soporte del sistema radical de las plantas y ayudan al suelo a ser más permeable y aireado (Casanova, 1996).

Suárez (1980) señala que casi ningún suelo está compuesto exclusivamente de uno solo de tales separados; lo normal es que exista una mezcla variable de ellos y con base en sus porcentajes relativos se diferencian los diversos tipos de textura, tal y como se presentan en la Tabla 3.5.

Tabla 3.5. Grupos texturales (Suárez, 1980).

Tipo de textura	Simbología	Grupo
Arenoso	a	Muy liviano
Arenoso-franco	aF	Muy liviano
Franco	F	Mediano
Franco-arenoso	Fa	Moderadamente liviano
Franco-limoso	Fl	Mediano
Franco arcillo-arenoso	FAa	Moderadamente pesado
Franco arcillo-limoso	FAl	Moderadamente pesado
Franco arcilloso	FA	Moderadamente pesado
Limoso	L	Mediano
Arcillo-arenoso	Aa	Suelo pesado
Arcillo-limoso	Al	Suelo pesado
Arcilloso	A	Suelo muy pesado

Tomando en consideración las propiedades intrínsecas de cada partícula de suelo: a, L y A y con la orientación de especialistas se ponderaron las clases texturales presentes en el Horizonte A de la parte media y alta del Río Mucujepe mostradas en la Tabla 3.6.

Tabla 3.6. Asignación de pesos de la clase textural.

Clase textural	Susceptibilidad a la erosión
a, aF, Fa, F	1 (Baja susceptibilidad a la erosión)
FAa, FA, Aa	2 (Moderada susceptibilidad a la erosión)
FL, FAL, AL	3 (Alta susceptibilidad a la erosión)
L, A	4 (Muy alta susceptibilidad a la erosión)

Tipo de estructura

La estructura es una propiedad típicamente edáfica, que, de presentarse, permite diferenciar un suelo de un material geológico. Su importancia hace que sea una propiedad morfológica de referencia en los estudios de suelo en campo (Porta, López y Roquero, 1999).

La estructura o modo como se ordenan las partículas individuales del suelo en unidades secundarias de mayor tamaño y que tienen un carácter resistente (peds, agregados) es también primordial en la determinación y en el control de la erosionabilidad de los suelos (Suárez, 1980). El tipo de estructura que presenta una unidad de suelo está relacionada con la oposición del suelo a ser alterado por la erosión debido al grado de agregación que él posee. Según Porta, López y Roquero (1999) un suelo bien estructurado es más resistente a la erosión que las partículas sueltas de arena, limo y arcilla y la materia orgánica.

Casanova (1996) afirma que para producir agregados debe haber un mecanismo que mantenga juntas las partículas de suelo, de manera que las formas estructurales en el suelo persistan con el tiempo, éste es la fracción coloidal o agente cementante. Existen tres agentes cementantes coloidales en la formación de agregados: 1) Minerales de arcilla, 2) Óxidos coloidales de hierro y manganeso, 3) Coloides orgánicos (materia orgánica).

Los procesos de humedecimiento y secado de los suelos determinan la estabilidad o permanencia de los agregados, la cual depende de las siguientes condiciones: a) Los agregados no deben dispersarse durante el proceso de humedecimiento y b) Los coloides deben ser capaces de mantener juntas las partículas dentro de los agregados cuando el suelo se humedece. Cuando los agregados son poco estables al agua, las partículas de arena, limo y arcilla se individualizan, se mueven y tapan los poros del suelo disminuyendo la permeabilidad al aire y al agua, aumentando la escorrentía y la erosión superficial de los suelos (Casanova, 1996).

Un mayor porcentaje de materia orgánica y arcilla aumentan el porcentaje de agregación de los suelos y los agregados tienden a ser de mayor tamaño. El menor porcentaje de los mismos disminuyen el porcentaje de agregación y los agregados tienden a ser muy pequeños (Casanova, 1996).

Consideraciones cualitativas de los tipos de estructura (Porta, López y Roquero, 1999).

En base a consideraciones morfológicas de naturaleza cualitativa se describen los tipos de estructura más comunes presentes en la parte media y alta de la cuenca del Río Mucujepe, éstos son:

- Estructura migajosa. Es muy porosa y sus epipedones tienen materia orgánica bien evolucionada.
- Estructura granular. Es la estructura más favorable. Típica de medios biológicamente activos ricos en bases y con materia orgánica.
- Estructura blocosa. Es típica de zonas semiáridas y áridas con suelos pobres en materia orgánica.
- Estructura laminar. Es originada por impacto de las gotas de lluvia en suelos y costras superficiales. Este tipo de estructura impide la penetración vertical de las raíces, el agua y el aire.
- Estructura en prismas o prismática. Es típica de horizontes enriquecidos en arcilla. Los prismas pueden ser capaces de presentar una gran dureza y las raíces no son capaces de penetrar en ellos.
- Estructura masiva. Se refiere a granos sueltos con ausencia de elementos finos, en donde no se observan agregados. Típica de horizontes arenosos.

Explicada la importancia de los tipos estructurales y los elementos que contribuyen en la mejora de los mismos y que influyen directa o indirectamente en el proceso erosivo, a continuación se presenta la Tabla 3.7 indicando la asignación de pesos o ponderación de los mismos según el grado de estabilidad que cada tipo presenta.

Tabla 3.7. Asignación de pesos de los tipos de estructura.

Tipo de estructura	Susceptibilidad a la erosión
Migajosa (grumosa) y granular (muy fina < 1 mm, y fina entre 1-2 mm).	1
Granular media (2-5 mm), gruesa (5-10 mm) y muy gruesa (> 10 mm).	2
Blocosa.	3
Laminar, en prismas y masiva.	4

Materia orgánica

Es importante incluir el estudio de la materia orgánica en la erosionabilidad del suelo debido a la influencia directa e indirecta que ella ejerce en los mismos. La materia orgánica tiene mayor capacidad de absorción y retención de agua que la porción mineral del suelo. También aumenta la capacidad de retención de humedad de los suelos, particularmente en aquellos de textura arenosa (Casanova, 1996).

Por otra parte, ayuda a la formación y estabilización de agregados al agua que impide la desagregación del suelo reduciendo la susceptibilidad a la escorrentía y erosión, ya que los agregados estables aumentan la permeabilidad y porosidad de los terrenos y mejoran su estructura y por ende mejoran la resistencia a la erosión.

Condiciona el comportamiento del suelo en relación al crecimiento de las plantas y microorganismos, al influir en el movimiento y en el almacenamiento de agua y de suministro de energía y nutrientes a los mismos, actuando de forma indirecta en el desarrollo del proceso erosivo ya que la vegetación contribuye a evitar la pérdida de suelo.

La materia orgánica favorece el oscurecimiento del color del epipedón ya que hace disminuir el albedo al ser menor la radiación reflejada en relación con la recibida. Incrementa la temperatura del suelo. Influye sobre el balance de energía (Porta, López y Roquero, 1999).

Todas las acciones atribuidas a la materia orgánica, antes señaladas, confirman la protección directa o indirecta que ésta ofrece contra la degradación del suelo a la erosión.

El contenido de materia orgánica se determina frecuentemente por la tonalidad más o menos oscura del horizonte respectivo (Suárez, 1980). Casanova (1996) afirma que los colores oscuros generalmente están asociados con una mayor contenido de materia orgánica. Por no contar con datos porcentuales de carbono orgánico (C.O. %) ni de materia orgánica porcentual (M.O. %) en los perfiles de los suelos de la cuenca media y alta del Río Mucujepe, y conociendo la relación directa que tiene el color del horizonte respectivo con la materia orgánica, se infirieron los valores porcentuales de M.O. a partir de los nombres de los horizontes de cada perfil de suelo descrito por el MARNR en el año 1982 y presentados en el Anexo 1.

La Tabla 3.8 clasifica y califica a su vez los valores de C.O. % y el aproximado de M.O. % de un perfil de suelo.

Tabla 3.8. Interpretación de valores relativos de carbono orgánico y materia orgánica de un perfil de suelo (Malagón, 1982).

C.O. %	M.O. % = C.O. % * 1,9 (Aprox.)
0-1 (Muy bajo)	0,0-1,9
1-1,5 (Bajo)	1,9-2,9
1,5-2,5 (Medio)	2,9-4,8
2,5-4,0 (Alto)	4,8-7,6
> 4,0 (Muy alto)	> 7,6

Considerando en parte la clasificación aportada por Malagón (1982) y los criterios de los especialistas en esta área, se clasificaron y se ponderaron los valores relativos de la susceptibilidad a la erosión hídrica de la materia orgánica en las cuatro categorías, mostradas en la Tabla 3.9.

Tabla 3.9. Asignación de pesos de los contenidos porcentuales de materia orgánica.

Materia orgánica (%)	Susceptibilidad a la erosión
> 8 (Muy alto)	1 (Baja susceptibilidad a la erosión)
5-8 (Alto)	2 (Moderada susceptibilidad a la erosión)
3-5 (Medio)	3 (Alta susceptibilidad a la erosión)
< 3 (Bajo)	4 (Muy alta susceptibilidad a la erosión)

Estableciendo relaciones entre contenidos de materia orgánica y otras variables, a continuación se presentan las siguientes asociaciones:

Los contenidos porcentuales de materia orgánica muy altos se asocian a sectores con vegetación exuberante y concentrada que están localizados básicamente en áreas deposicionales, las cuales tienen poca pendiente. Porta, López y Roquero (1999) señalan que la vegetación exuberante localizada en sitios que presentan mucha materia orgánica se debe a que la materia orgánica además de proporcionar energía y nutrientes a la flora, contiene reguladores de crecimiento que estimulan el crecimiento vegetal.

Los contenidos de materia orgánica altos existen en áreas deposicionales donde el tipo de vegetación predominante es arbustiva.

Los contenidos de materia orgánica medios se ubican en áreas donde la vegetación es dispersa y con pendientes fuertes, que incide en el arrastre de dichos contenidos.

Los contenidos de materia orgánica bajos indican áreas con ausencia total o parcial de vegetación, debido a varios factores, entre ellos los climáticos así como también las pendientes fuertes a muy fuertes, lo que hace casi nula la acumulación de materia orgánica en el horizonte superficial y subsuperficial de los suelos.

Permeabilidad

Es la capacidad del suelo para transmitir agua y aire, es decir, la facilidad con que el agua y el aire circulan o se mueven a través del suelo. Esta facilidad depende de la cantidad y tamaño de poros existentes en el interior del suelo. Se refiere al drenaje interno del terreno (Suárez, 1980).

Según Porta, López y Roquero (1999) el estudio de la permeabilidad tiene interés en la degradación de suelos por erosión hídrica y en investigaciones sobre escurrimiento.

Entre los factores que controlan la permeabilidad están las características de la lluvia o del riego por aspersión (intensidad, tamaño de las gotas y energía cinética de la lluvia); las características del suelo (tipo y grado de estructura, clase textural, contenido inicial de humedad, cubierta vegetal, cubiertas artificiales, etc.); las características de la calidad del agua (partículas en suspensión, temperatura, salinidad y sodicidad); las características del medio (pendiente y vegetación) y factores interferentes (aire atrapado, laboreo reciente, pisoteo y trial), estos dos últimos compactan la superficie del suelo, por lo que aumentan el riesgo de erosión (Porta, López y Roquero, 1999).

La permeabilidad es la cuarta propiedad considerada importante para conocer la susceptibilidad de los suelos del Mucujepe a la erosión hídrica. Debido a que la permeabilidad depende de la clase textural, se hizo necesario recurrir a valores tabulares que indiquen la relación directa de la permeabilidad con la clase textural para cualquier suelo. Para ello en la Tabla 3.10 se señala los valores de la velocidad de permeabilidad (cm/h) y su capacidad de almacenaje (cm/cm de suelo), según la clase textural y en la Tabla 3.11 se relaciona directamente el tipo de permeabilidad con la textura.

Tabla 3.10. Valores de la velocidad de la permeabilidad y su capacidad de almacenaje según la clase textural de los suelos (Sánchez, 1974, citado por Malagón, 1982).

Clase textural	Permeabilidad (cm/h)	Cap. de almacenaje (cm/cm de suelo)
Arcilloso (A), arcillo limoso (AL)	0,15-0,50	0,14-0,16
Franco arcillo limoso (FAL)	0,50-1,60	0,18-0,20
Franco arcilloso (FA)	0,15-1,60	0,18-0,20
Franco (F)	1,60-5,00	0,14-0,18
Franco limoso (FL)	1,60-5,00	0,15-0,20
Arcillo arenoso (Aa)	0,15-0,50	0,12-0,16
Franco arcillo arenoso (FAa)	0,50-1,60	0,10-0,16
Franco arenoso muy fino (Fa)	1,60-5,00	0,16-0,18
Franco arenoso (Fa)	5,0-16,0	0,11-0,13
Areno francoso (aF)	16,0-50,0	0,08-0,10
Arenoso (a)	50,0-más	0,06-0,08

Tabla 3.11. Clase de permeabilidad del perfil, según la codificación del USDA-Soil Survey Manual (Ministerio de Medio Ambiente, 1998)

Permeabilidad	Textura
1. Rápida a muy rápida	Arenosa (a)
2. Medianamente rápida	Areno francosa (aF)
3. Moderada	Franco arenosa (Fa)
4. Moderadamente lenta	Franca (F), Limosa (L), Franco limosa (FL) y Franco arcillo arenosa (FAa).
5. Lenta	Franco arcillosa (FA) y Franco arcillo limosa (FAL).
6. Muy lenta	Arcillo arenosa (Aa), Arcillo limosa (AL) y Arcillosa (A).

Los valores de las tablas 3.10 y 3.11 se pueden utilizar cuando no existan datos de permeabilidad en un estudio de suelo.

Combinando la Tabla 3.10, que indica la relación entre la textura y la velocidad de permeabilidad, con la Tabla 3.11, que califica la permeabilidad según la clase textural, se obtuvo la Tabla 3.12 en la que se califica a partir de la clase textural la permeabilidad.

Tabla 3.12. Calificación de la permeabilidad según el tipo de clase textural (Malagón, 1982; Ministerio de Medio Ambiente, 1998)

Tipo de textura	Permeabilidad (cm/h)	Calificación de la permeabilidad
a	50,0-más	Rápida a muy rápida
aF	16,0-50,0	Medianamente rápida
Fa	5,0-16,0	Moderada
FAa	0,5-1,6	Moderadamente lenta
FL	1,6-5,0	Moderadamente lenta
L	1,6-5,0	Moderadamente lenta
F	1,6-5,0	Moderadamente lenta
FAL	0,5-1,6	Lenta
FA	0,15-1,6	Lenta
AL	0,15-0,5	Muy lenta
Aa	0,15-0,5	Muy lenta
A	0,15-0,5	Muy lenta

Considerando la Tabla 3.6 en la que se le asigna pesos a cada clase textural y la Tabla 3.12 en la que se califica a la permeabilidad según el tipo de textura se obtuvo la Tabla 3.13 en la que se asigna pesos o calificaciones a la permeabilidad.

Tabla 3.13. Asignación de pesos de la permeabilidad.

Textura	Permeabilidad	Ponderación
aF y a	De medianamente rápida a muy rápida	1
Fa	Moderada	2
F, L, FL y FAa	Moderadamente lenta	3
A, Aa, AL, FA y FAL	Muy lenta a lenta	4

En la Tabla 3.14 se agrupan las cuatro propiedades consideradas del suelo y su correspondiente ponderación de la susceptibilidad a la erosión hídrica.

Tabla 3.14. Asignación de pesos de las propiedades consideradas en los suelos de la cuenca media y alta del Río Mucujepe.

Propiedades consideradas	Condición de las propiedades consideradas	Ponderación a la susceptibilidad erosiva
Clase textural	a, aF, Fa, F	1
	FAa, FA, Aa	2
	FL, FAL, AL	3
	L, A	4
Tipo de estructura	Migajosa (grumosa) y granular (muy fina < 1 mm, y fina entre 1-2 mm).	1
	Granular media (2-5 mm), gruesa (5-10 mm) y muy gruesa (> 10 mm).	2
	Blocosa.	3
	Laminar, en prismas (columnar y prismática) y masiva.	4
Contenido de materia orgánica (%)	>8 (Muy alto)	1
	5-8 (Alto)	2
	3-5 (Medio)	3
	< 3 (Bajo)	4
Permeabilidad	De medianamente rápida a muy rápida	1
	Moderada	2
	Moderadamente lenta	3
	Muy lenta a lenta	4

A las cuatro propiedades consideradas del suelo en esta cuenca, le fueron asignadas las calificaciones respectivas según sus características intrínsecas, tal y como se aprecia en la Tabla 3.14. La escala utilizada para ponderar o calificar la susceptibilidad de los suelos a la erosión hídrica de las cuatro propiedades consideradas comprende cuatro calificaciones o pesos, a saber:

- 1 = Baja susceptibilidad.
- 2 = Moderada susceptibilidad.
- 3 = Alta susceptibilidad.
- 4 = Muy alta susceptibilidad.

Una vez asignada la calificación o peso de la susceptibilidad a la erosión hídrica de las cuatro propiedades de los suelos descrita en la Tabla 3.14, se procedió a obtener el valor de la susceptibilidad de cada perfil de suelo descrito por el MARNR (1982), utilizando para ello las combinaciones y los rangos presentados a continuación:

- Las **combinaciones** de las susceptibilidades a la erosión hídrica de las propiedades de los suelos atendiendo a su escala son:

4*1 = 4 (Poco susceptible a erosionarse)

4*2 = 8 (Moderadamente susceptible a erosionarse)

4*3 = 12 (Altamente susceptible a erosionarse)

4*4 = 16 (Muy alta susceptibilidad a erosionarse)

4 simboliza el número de propiedades evaluadas en los suelos de la cuenca del Río Mucujepe.

En las tablas 3.16 y 3.19 se muestran las sumatorias de las propiedades de los suelos del Mucujepe considerando la escala anterior.

El producto de estas combinaciones generaron cuatro rangos de susceptibilidad de los suelos a la erosión hídrica.

- Los **rangos** adaptados a los suelos de las partes media y alta de la cuenca del Río Mucujepe son los siguientes:

4 = 1 (Baja susceptibilidad a la erosión hídrica)

5-8 = 2 (Moderada susceptibilidad a la erosión hídrica)

9-12 = 3 (Alta susceptibilidad a la erosión hídrica)

13-16 = 4 (Muy alta susceptibilidad a la erosión hídrica)

Con los valores asignados de susceptibilidad a la erosión de cada perfil de suelo descrito en las subunidades taxonómicas de suelo y aplicando un promedio aritmético de dichos perfiles se logró el valor de susceptibilidad a la erosión de cada subunidad taxonómica de suelo de la cuenca (Tabla 3.16). Finalmente, del promedio aritmético de las subunidades taxonómicas de suelo, se generó el mapa de subunidades taxonómicas de suelo ponderado o, lo que es lo mismo, se produjo el mapa del componente suelo ponderado (CS) correspondiente a la parte media y alta de la cuenca del Río Mucujepe (Figura 4.7).

La Tabla 3.15 describe las propiedades de los suelos consideradas en esta investigación, correspondiente a la parte media y alta de la cuenca del Río Mucujepe por subunidades taxonómicas.

En la Tabla 3.16 se muestra la ponderación o asignación de pesos lograda en cada subunidad taxonómica de suelo (S-U) a partir de la caracterización expuesta en la Tabla 3.15. También presenta el valor promedio asignado a cada subunidad taxonómica de suelo de la cuenca.

De las dos salidas de campo realizadas en este trabajo para verificar los datos aportados por el estudio de suelo hecho por el MARNR (1982), se produjo la Tabla 3.17, la cual muestra una

caracterización de las propiedades consideradas de los perfiles de suelo evaluados en campo de la cuenca media y alta del Río Mucujepe. Considerando sólo el Horizonte A de los datos de campo, en cada perfil de suelo descrito, se generó la Tabla 3.18, en la cual se describen las cuatro propiedades consideradas del Horizonte A de los suelos de la cuenca media y alta del Río Mucujepe. La Tabla 3.19 pondera las propiedades del Horizonte A de los cinco perfiles descritos en campo y corrobora los datos aportados por la Tabla 3.16.

La Fotografía 3.1 ilustra uno de los perfiles de suelo descritos en la primera salida de campo de este estudio, en fecha 05/04/2001, cuyos datos se presentan en la Tabla 3.17.



Fotografía 3.1. Perfil de suelo # 2. Sector Mesa del Caraño (05/04/2001), parte media de la cuenca del Río Mucujepe.

Tabla 3.15. Propiedades evaluadas de los suelos, por subunidades taxonómicas, en la cuenca media y alta del Río Mucujepe (MARNR, 1982).

Ubicación (Altitud: msnm)	*S-U	Orden	Gran grupo	Profundidad HA (cm)	Clase textural	Tipo de estructura	Contenido de materia orgánica (%)	Permeabilidad	Observaciones
NO (1.200-1.600)	A1	Entisol	Typic Troporthent	0-85/170	FAa	Blocosa subangular	< 3 (Bajo)	Moderadamente lenta	Cierta inestabilidad.
SE y NO (Distribuida en casi toda la cuenca)	A2 (T-4)	Inceptisol	Dystropepts	0-15	A	Blocosa subangular	< 3 (Bajo)	Muy lenta	Muy inestables. Fácil de ser erosionado.
	A2 (T-10)	Inceptisol	Humitropepts	0-100	Fa	Migajosa	5-8 (Alto)	Moderada	Susceptible a derrumbes por solifluxión.
	A2 (T-)	Ultisol	Tropohumults	0-25	F	Migajosa	5-8 (Alto)	Moderadamente lenta	-
E (2.200-2.800)	A2 (T-6)	Molisol	Hapludolls	0-30/40	FA	Migajosa	5-8 (Alto)	Lenta	-
	A3 (T-1)	Inceptisol	Humitropepts	0-15	A	Blocosa subangular	5-8 (Alto)	Muy lenta	Susceptible a la erosión.
	A3 (T-11)	Ultisol	Tropudults	0-25	FA	Blocosa subangular	5-8 (Alto)	Lenta	-
E (2.800-3.000)	A3 (T-12)	Ultisol	Tropohumults	0-30	F	Blocosa subangular	5-8 (Alto)	Moderadamente lenta	-
	B	Ultisol	Humoxic tropohumults	0-30	F	Migajosa	5-8 (Alto)	Moderadamente lenta	Susceptible a la erosión. Estable en su mayor parte e inestable en una mínima.
O (150-400)	C1	Inceptisol	Eutropepts	0-12/13	F	Blocosa subangular	3-5 (Medio)	Moderadamente lenta	Poca susceptibilidad a la erosión.
	C1	Ultisol	Tropudults	0-10/20	Fa y aF	Blocosa subangular	3-5 (Medio)	Moderada	-
E (200)	C2	Entisol	Tropofluvents (Suelos que tienen un hidromorfismo muy bajo)	0-10	Fa	Sin estructura	< 3 (Bajo)	Moderada	-
O	D1	Inceptisol	Dystropepts	0-17	A	Migajosa	3-5 (Medio)	Muy lenta	Sometida a erosión durante un largo tiempo.
		Ultisol	Tropudults	0-10/20	F	Blocosa subangular	3-5 (Medio)	Moderadamente lenta	-

*S-U = Subunidad taxonómica de suelo

Tabla 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.

Ubicación en la cuenca (Altitud: msnm)	*S-U	Orden	Gran grupo	Clase textural	Tipo de estructura	Materia orgánica (%)	Permeabilidad	Sumatoria	Grado de susceptibilidad a la erosión
NO (1.200-1.600)	A1	Entisol	Typic Troporthent	2	3	4	3	12	3
SE y NE (Distribuida en casi toda la cuenca)	A2	Inceptisol	Dystropepts	4	3	4	4	15	4
		Inceptisol	Humitropepts	1	1	2	2	6	2
		Ultisol	Tropohumults	1	1	2	3	7	2
		Molisol	Hapludolls	2	1	2	4	9	3
E (2.200-2.800)	A3	Inceptisol	Humitropets	4	3	2	4	13	4
		Ultisol	Tropudults	2	3	2	4	11	3
		Ultisol	Tropohumults	1	3	2	3	9	3
E (2.800-3.000)	B	Ultisol	Humoxic tropohumults	1	1	2	3	7	2
		C1	Inceptisol	Eutropepts	1	3	3	3	10
O (150-400)	C1		Ultisol	Tropudults	1	3	3	2	9
		E (200)	C2	Entisol	Tropofluvents (Suelos que tienen un hidromorfismo muy bajo)	1	4	4	2
O	D1				Inceptisol	Dystropepts	4	1	3
		Ultisol	Tropudults	1	3	3	3	10	3

*S-U = Subunidad taxonómica de suelo

Tabla 3.17. Caracterización general de los perfiles evaluados en campo de los suelos de la cuenca media y alta del Río Mucujepe (Salidas de campo. 05/04/01 y 26/04/01).

Ubicación	Orden	Subunidad de suelo al cual pertenece	Perfil	Profundidad de los horizontes (cm)	Clase textural	Tipo de estructura	Contenido de materia orgánica (%)	Permeabilidad	Observaciones de campo
Cercana a la confluencia del Río Cacique y La Roncona	Entisol	C2 (Entisol)	P1	A1 (0-15/20)	aF	Sin estructura	1,13	Medianamente rápida	En el sitio de muestreo hay erosión laminar en muy baja intensidad, por la presencia de un manto vegetal de diversos cultivos.
				C1 (15/20-45)	aF	Sin estructura	0,52	Medianamente rápida	
				C2 (45-60)	aF-Fa	Bloques subangulares	0,40	Medianamente rápida a moderada	
				C3 (60-85)	Fa	Bloques subangulares	1,13	Moderada	
Mesa del Caraño	Ultisol	D1 (Inceptisol y Ultisol)	P2	A1 (0-20/25)	F	Granular de tamaño fino	2,96	Moderadamente lenta	Las cunetas de la carretera de tierra funcionan como erosión en surcos, las rocas dentro de éstas funcionan como diques. En las áreas cercanas, no existe evidencia de erosión debido a la protección vegetal presente en las mismas.
				Bt (20/25-38)	F	Bloques subangulares	2	Moderadamente lenta	
La Caña Brava	Inceptisol	A2 (Inceptisol, Ultisol y Molisol)	P3	A1 (0-27)	FA	Columnar	4,35	Lenta	Hay erosión laminar fuerte en la vertiente izquierda de la cuenca.
				Bw (27-80)	A	Columnar	1,31	Muy lenta	
La Cuesta	Entisol	A2 (Inceptisol, Ultisol y Molisol)	P4	A1 (0-25)	Fa	Granular fina	6,24	Moderada	Erosión superficial muy poca y de muy baja intensidad. Zona bien protegida.
				A1 (25-35)	-	Granular	-	-	
La Osa	Entisol	A2 (Inceptisol, Ultisol y Molisol)	P5	A1 (0-28)	Fa-F	Blocosa subangular	14,47	De moderadamente lenta a moderada	La erosión superficial no se observa, sólo se aprecian movimientos en masa.
				A1 (28-54)	FA	Blocosa subangular	2,34	Lenta	

Tabla 3.18. Propiedades evaluadas del Horizonte A (HA) de cada subunidad taxonómica de suelo de la cuenca media y alta del Río Mucujepe.

Ubicación	Orden	Subunidad de suelo al cual pertenece	Perfil	Profundidad HA (cm)	Clase textural a A L C.T.	Tipo de estructura	Materia orgánica (%)	Permeabilidad
Cercana a la confluencia Río Cacique y Quebrada La Roncona	Entisol	C2 (Entisol)	P1 (1ra salida)	0-15/20	80 2 18 aF	Sin estructura	1,13	Medianamente rápida
Mesa del Caraño	Ultisol	D1 (Inceptisol y Ultisol)	P2 (1ra salida)	0-20/25	48 20 32 F	Granular de tamaño fino	2,96	Moderadamente lenta
La Caña Brava	Inceptisol	A2 (Inceptisol, Ultisol y Molisol)	P3 (1ra salida)	0-27	32 30 38 FA	Columnar	4,35	Lenta
La Cuesta	Entisol	A2 (Inceptisol, Ultisol y Molisol)	P4 (2da salida)	0-25	54 14 32 Fa	Granular de tamaño fino	6,24	Moderada
La Osa	Entisol	A2 (Inceptisol, Ultisol y Molisol)	P5 (2da salida)	0-28	52 16 32 Fa-F	Blocosa subangular	14,47	De moderada a moderadamente lenta

Tabla 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.

Ubicación	Orden	Subunidad de suelo al cual pertenece	Perfil	Clase textural	Tipo de estructura	Materia orgánica (%)	Permeabilidad	Sumatoria	Grado de susceptibilidad a la erosión
Cercana a la confluencia Río Cacique y La Roncona.	Entisol	C2 (Entisol)	P1 (1ra salida)	1	4	4	1	10	3 (Moderado)
Mesa del Caraño	Ultisol	D1(Inceptisol y Ultisol)	P2 (1ra salida)	1	1	4	3	9	3 (Moderado)
La Caña Brava	Inceptisol	A2 (Inceptisol, Ultisol y Molisol)	P4 (1ra salida)	2	4	3	4	13	4 (Alto)
La Cuesta	Entisol	A2 (Inceptisol, Ultisol y Molisol)	P1 (2da salida)	1	1	2	2	6	2 (Bajo)
La Osa	Entisol	A2 (Inceptisol, Ultisol y Molisol)	P2 (2da salida)	1	3	1	2	7	2 (Bajo)

b.3. Componente morfobioclimático.

Este componente contempla cuatro variables: Precipitación (P), Temperatura (T), Zonas de vida (ZV) y Grado de meteorización química (GM). Cada una de estas cuatro variables fueron ponderadas con pesos de susceptibilidad a la erosión desde 1 hasta 4.

La ecuación matemática que define el componente morfobioclimático es:

$$CMB = \frac{P + T + ZV + GM}{4}$$

El promedio aritmético de estos cuatro elementos bioclimáticos generó el mapa del componente morfobioclimático ponderado (CMB) de la cuenca, con cuatro pesos o calificaciones de susceptibilidad del suelo a la erosión hídrica.

A continuación se explica la elaboración y ponderación de los elementos bioclimáticos que conforman el componente morfobioclimático del modelo matemático de erosión potencial.

Precipitación

Las precipitaciones por sus efectos múltiples, percusión de las gotas de lluvia y escurrido, son la causa más directa del fenómeno de la erosión (López, 1968).

Las características de una lluvia permiten explicar su efectividad potencial en la erosión del suelo o erosividad. Una misma lluvia tendrá diferente poder erosivo real según la susceptibilidad a la erosión del suelo que la recibe, es decir según la erosionabilidad de éste (Porta, López y Roquero, 1999).

Las precipitaciones, al considerarlas en el espacio y el tiempo, establecen como unidad natural el aguacero. La intensidad, la duración y la frecuencia de los aguaceros son las características de mayor significación en la erosión (Mintegui y López, 1990).

La intensidad de la lluvia es una medida cualitativa o cuantitativa de la severidad de un evento de lluvia en un sitio determinado. La intensidad de la lluvia depende de la duración (d) de ésta, teniendo las lluvias de corta duración, generalmente intensidades mayores que las de larga duración (MARNR, 1977).

La frecuencia está relacionada con la intensidad y la duración de la lluvia. El concepto de frecuencia de una cierta cantidad de lluvia de una intensidad determinada, se expresa mejor con el término "Intervalo de Recurrencia", es decir, el período de retorno (Tr), que son los años necesarios para que el evento sea igualado o excedido una vez (MARNR, 1977).

La Federación Nacional de Cafeteros de Colombia (1975) afirma que la intensidad del aguacero es el factor pluviométrico más importante y junto con la frecuencia de los aguaceros, la capacidad de almacenamiento de agua por el suelo y la velocidad de infiltración, afectan la escorrentía y la erosión, por esta razón se consideró conveniente trabajar en esta investigación más que con la cantidad de lluvia con la intensidad de la misma.

Las intensidades consideradas son de corta duración, es decir, 6 horas y 2 años de período de retorno.

Con los datos recopilados de precipitación extrema para 6 horas de duración de la cuenca media y alta del Río Mucujepe, se procedió a generar el mapa de intensidades extremas de la cuenca para 6 horas de duración y 2 años de período de retorno, el cual provee información sobre la distribución espacial de las intensidades máximas en la cuenca y el comportamiento máximo de los volúmenes de precipitación de la misma. A continuación se explica la manera como se realizó este mapa.

a) Elaboración del mapa de intensidades extremas o máximas.

El mapa de intensidades extremas (Figura 4.8), se elaboró siguiendo los pasos siguientes:

a1. Se obtuvieron datos mensuales de lluvias extremas en mm, para 6 horas de duración (véase Anexo 4), de las dos estaciones climatológicas más representativas en la cuenca en estudio, Mucujepe ubicada dentro de ésta, y La Cuchilla cercana a la parte alta de la cuenca (Tabla 3.20).

Tabla 3.20. Estaciones climatológicas más representativas de la cuenca media y alta del Río Mucujepe (MARN, 2000).

Estaciones climatológicas	Región	Coordenadas geográficas	Serial	Fecha de instalación	Altitud (msnm)	Años de registro de datos	Imáx., 6horas y 2años, (mm/h) (1981-1995)
Mucujepe	Zulia	8° 38' 53"N 71°34'08"W	3199	03/1980	220	1980-1994	12,46
La Cuchilla	Mérida	8° 38' 00"N 71°21'10"W	3040	06/1963	2.280	1964-1993	8,01

a2. Se estimaron los datos de las intensidades máximas o extremas de las dos estaciones consideradas que cubren gran parte de la cuenca. Se calculó el modelo de regresión lineal para cada estación climatológica a partir de datos de lluvias máximas de 6 horas de duración, calculándose así los valores de las intensidades extremas para 6 horas de duración y 2 años de período de retorno. Los modelos de regresión obtenidos con Excel se presentan en la Tabla 3.21 y los gráficos correspondientes de los mismos se ilustran en el Anexo 5, siendo el Gráfico 5a la ilustración de intensidades extremas para la Estación Mucujepe y el Gráfico 5b muestra la tendencia de las intensidades extremas de la Estación La Cuchilla.

Tabla 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.

Modelo de regresión lineal generado en Excel	Imáx., 6horas y 2 años, (mm/h)
Imáx. (6 horas y Tr de 2 años) Mucujepe = 7,0297Ln (2 años) + 7,5864	12,46
Imáx. (6 horas y Tr de 2 años) La Cuchilla = 1,1601Ln (2 años) + 7,2094	8,01

a3. Se aplicó el criterio del gradiente altitudinal para evaluar el comportamiento general de las precipitaciones extremas en las estaciones Mucujepe y La Cuchilla, consideradas como las dos estaciones climatológicas que cubren gran parte del área estudiada.

a4. El trazado definitivo de las isoyetas extremas en la cuenca del Río Mucujepe se ajustó de acuerdo a la orientación de las isoyetas regionales y tomando en cuenta el relieve de la cuenca.

Se realizó una interpolación lineal entre el valor de intensidad extrema de la Estación Mucujepe (12,46 mm/h) y el de la Estación La Cuchilla (8,01 mm/h), determinándose el gradiente altitudinal cada 100 m. Este valor fue de 0,22 mm/h/100 m, a partir del cual se trazaron las intensidades máximas con valores de lluvias extremas.

Los valores de intensidades extremas fueron los siguientes: a nivel de la Panamericana, límite inferior del área de estudio, el valor de la intensidad máxima fue de 14 mm/h, en la estación climatológica Mucujepe el valor fue 12,46 mm/h que se aproximó a 13 mm/h; en la curva de nivel 1.000 msnm la intensidad máxima fue de 10,74 mm/h que se aproximó en 11 mm/h, en la curva de nivel 2.000 msnm el valor fue de 8,54 mm/h que se redondeó a 9 mm/h y en la curva de nivel 2.900 msnm, casi en el límite superior de la parte alta de la cuenca del Río Mucujepe, el valor de la intensidad máxima fue de 6,56 mm/h que se redondeó a 7 mm/h. El mapa de intensidades máximas ilustra la distribución espacial en la cuenca de las mismas.

b) Ponderación del mapa de intensidades extremas

La variable precipitación se ponderó tomando en consideración las cantidades de lluvia máximas para 6 horas de duración y un período de retorno de 2 años, expresadas en mm/h, de las dos estaciones climatológicas más representativas al área en estudio (Figura 4.9). Los rangos de valores asignados a esta variable ambiental se presentan en la Tabla 3.22.

Tabla 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.

Intensidad máxima en 6 horas y 2 años, (mm/h)	Susceptibilidad a la erosión
(13-14)	4
(11-13)	3
(9-11)	2
(7-9)	1

Estos valores indican que mientras mayor sea la intensidad de lluvia máxima de un área correspondiente de la cuenca, mayor será la capacidad erosiva de la lluvia.

Temperatura

La lluvia y la temperatura son los componentes del clima que principalmente influyen sobre la susceptibilidad del suelo a la erosión hídrica, actuando siempre en forma combinada.

La zona tropical presenta como característica común la pequeña variación anual de la temperatura; es una consecuencia de la uniformidad en la duración del período diurno y nocturno durante todo el año en latitudes bajas; así, la temperatura del aire varía con la altura del lugar (Sánchez, 1965).

A pesar de que se le ha prestado poca atención y poco tiempo al estudio de los efectos de la temperatura del suelo, los procesos físicos, químicos y biológicos de un ecosistema están fuertemente influenciados por la temperatura. La importancia del color del suelo se debe a su papel como factor de control de la intensidad de una serie de procesos que suelen alcanzar un máximo dentro de un cierto intervalo de temperaturas (Porta, López y Roquero, 1999).

La influencia de la temperatura en el proceso de erosión hídrica es de manera indirecta, a través de la aceleración o desaceleración de las reacciones químicas de la actividad microbiana en la producción de materia orgánica, la cual actúa como protectora de la erosión de los suelos.

La velocidad de las reacciones químicas de los microorganismos en el suelo para descomponer restos vegetales hasta convertirlos en materia orgánica, aumentan en proporciones definidas con el aumento en temperatura y de allí la influencia de esta integrante del clima sobre la materia orgánica (Suárez, 1980). A temperaturas bajo cero grados centígrados, se detienen las reacciones químicas en el suelo y a medida que aumenta la temperatura, las mismas se incrementan aumentando la descomposición y acumulación de materia orgánica en el suelo.

Porta, López y Roquero (1999) señalan que la temperatura también afecta las reacciones en una meteorización química de las rocas y minerales de acuerdo con la Ley de Vant'hoff, duplicándose según dicha ley la velocidad de las reacciones al aumentar 10 °C la temperatura.

a) Elaboración del mapa de isotermas al relieve

El mapa de isotermas se elaboró siguiendo los pasos siguientes:

a1. Se obtuvieron datos anuales de temperatura en °C desde 1960 hasta 1995, de las dos estaciones climatológicas ubicadas alrededor de la cuenca del Río Mucujepe: El Vigía y La Cuchilla (Tabla 3.23). No se consideró en este análisis la Estación Climatológica Mucujepe por carecer ésta de datos de temperatura.

Tabla 3.23. Temperatura promedio anual de las estaciones climatológicas cercanas a la cuenca media y alta del Río Mucujepe (MARN, 2000).

Estaciones	Región	Coordenadas geográficas	Serial	Fecha de instalación	Altitud (msnm)	Temperatura media anual (°C/año), (1960-1995)
El Vigía	Zulia	8° 36'27''N 71°37'47''W	3035	09/1942	130	27,9
La Cuchilla	Mérida	8° 38'00''N 71°21'10''W	3040	06/1963	2.280	15,6

a2. Se aplicó el criterio del gradiente altitudinal para evaluar el comportamiento espacial y temporal de la temperatura, considerando dos estaciones climatológicas: El Vigía (ubicada en las cercanías de la parte media de la cuenca) y La Cuchilla (localizada hacia la parte alta de la cuenca).

a3. El trazado definitivo de las isotermas de la cuenca del Río Mucujepe se ajustó tomando en cuenta el relieve de la misma, razón por la cual se le llama *isotermas al relieve*. Realizándose una interpolación lineal del promedio anual, para 35 años de registro, de la temperatura en la Estación El Vigía (27,9 °C) y el promedio anual de temperatura en la Estación La Cuchilla (15,6 °C), se determinó el gradiente altitudinal cada 100 m. Este valor fue de 0,57, a partir del cual se determinaron las isotermas al relieve cada 400 msnm, comenzando con la curva de nivel 200 y finalizando en la curva 3.000, tomando para ello el valor inicial de la temperatura promedio correspondiente a la Estación EL Vigía (Tabla 3.24).

Tabla 3.24. Isotermas al relieve de la parte media y alta de la cuenca del Río Mucujepe.

Curva de nivel (msnm)	Temperatura (°C/año)	Gradiente altitudinal (°C/año/100 m)
200	27	0,57
600	25	
1.000	23	
1.400	21	
1.800	18	
2.200	16	
2.600	14	
3.000	12	

La distribución espacial de las isotermas al relieve se presenta en la Figura 4.10, en la cual se ilustra el valor de cada isoterma según el valor de la curva de nivel, como se señaló en la Tabla 3.24.

b) Ponderación de los valores de las isotermas al relieve

Al igual que la precipitación, a medida que los valores de temperatura media anual suben, el riesgo a la erosión también se incrementa. La Tabla 3.25 y la Figura 4.11 (ilustrada en el Capítulo IV, de Resultados y discusión) indican los valores promedios anuales (°C/año) de temperatura obtenidos en el área de estudio y su correspondiente valor de ponderación.

Tabla 3.25. Asignación de pesos a los promedios anuales de temperatura (°C/año) de la cuenca media y alta del Río Mucujepe.

Temperatura (°C/año)	Susceptibilidad a la erosión
(27-23)	4
(23-18)	3
(18-14)	2
(14-12)	1

Zonas de vida

Las zonas de vida clasificadas por Holdridge son unidades climáticas naturales en la que se agrupan diferentes asociaciones, correspondientes a determinados ámbitos de temperatura, precipitación y humedad (Ewel y Madriz, 1968).

Como medida de calor se utiliza la biotemperatura media anual, que es la suma de los promedios diarios de temperatura sobre 0 °C y hasta 30 °C, dividido entre el número de días del año. La biotemperatura indica el ámbito de variación dentro del cual la vida vegetativa se encuentra activa. La precipitación es el segundo de los parámetros que participa en la determinación de las zonas de vida. Ésta se mide como el promedio de precipitación (lluvia, nieve, menos rocío) total por año en milímetros, caída en la zona de nuestro interés (CIDIAT, 1984).

Esta clasificación bioclimática se basa en determinar el tipo de vegetación o ecosistema que debería existir, siempre y cuando estén dadas determinadas condiciones de biotemperatura, precipitación, y altitud.

a) Elaboración del mapa de zonas de vida de la cuenca

El mapa de zonas de vida de la cuenca media y alta del Mucujepe (Figura 2.6), tomado de Goyo y Leal (1988), se presentó en la descripción del área de estudio.

b) Ponderación del mapa de zonas de vida de la cuenca

La ponderación de las zonas de vida presentes en la cuenca del Mucujepe (Figura 4.12) se hizo siguiendo la caracterización que éstas tienen. La Tabla 3.26 indica los tipos de zonas de vida presentes en la cuenca y su respectiva asignación de pesos o ponderación.

Tabla 3.26. Asignación de pesos a las zonas de vida presentes en la cuenca media y alta del Río Mucujepe.

Zonas de vida de la cuenca según Holdridge	Susceptibilidad a la erosión
Bh-T	4
Bh-P	3
Bh-Mb	2
Bmh-M	1

En la medida que la zona de vida presente condiciones mayores de temperatura, precipitación y menor altitud, las condiciones se hacen más favorables para presentar mayores valores de susceptibilidad a la erosión hídrica.

Grado de meteorización química

El grado de meteorización química también se consideró como otra variable bioclimática importante al momento de determinar la erosión potencial.

La meteorización es un proceso que afecta a las rocas y minerales. Porta, López y Roquero (1999) la definen como la transformación parcial o total, isovolúmica o no, de las rocas y los minerales de una roca “in situ”, sedimentos, depósitos o suelo, al entrar en contacto con la atmósfera, por aflorar o estar muy cerca de la superficie, a unos pocos metros de ella.

Los procesos de meteorización (meteorización física, química y biológica) compatibles con unas determinadas condiciones del medio pueden actuar de modo simultáneo. A pesar de ello, en esta investigación se consideró sólo la meteorización química, como si se tratase de un proceso independiente, lo cual no se corresponde con la realidad.

La meteorización química se refiere a transformaciones que afectan a la composición química y mineralógica de la roca, que dan lugar a mezclas de minerales de composición variable y compleja por transformación y por neoformación. Son reacciones sencillas, lentas, incompletas e irreversibles, al tener lugar en un sistema abierto.

El agente meteorizante más importante es el agua, su efecto es más intenso al aumentar su contenido en ácidos o en bases y es influenciado por las condiciones existentes. La meteorización química se lleva a cabo a través de diversas reacciones, entre las cuales las más caracterizadas son: la oxidación y la reducción, la carbonatación, la hidratación y la solución (Suárez, 1980).

Según Suárez (1980) la oxidación ocurre especialmente debido a la acción del oxígeno. La reducción o sea la pérdida de oxígeno, ocurre en terrenos donde hay escasa aireación. La carbonatación se refiere al acción sobre las rocas del CO₂ que contiene el aire y el agua. De esta manera se forman los carbonatos, los cuales se acumulan en el suelo o son lavados por el agua. La hidrólisis y la solución son los procesos predominantes en la meteorización química de las rocas. Consisten en la reacción entre el agua y diversos compuestos químicos para formar productos secundarios.

Las características climáticas, precipitación y temperatura, determinan fundamentalmente el predominio de uno u otro tipo de meteorización. Según el modelo propuesto por Barnes (1980) y modificado por Porta, López y Roquero (1999) la *meteorización química débil* se presenta en áreas con escasas precipitaciones y bajas temperaturas, por el contrario la *meteorización química intensa* predomina en sitios con altas precipitaciones y altas temperaturas.

Algunos factores que controlan la velocidad y la naturaleza de los productos finales de la meteorización química (Porta, López y Roquero, 1999) son:

- El agua ya que interviene en las reacciones (hidrólisis), además que el agua contiene sustancias activas.
- La temperatura al acelerar las reacciones. Ley de Van'hoff.
- La materia orgánica al actuar como agente reductor.
- Los microorganismos al catalizar ciertas reacciones. Los agentes biológicos son activos participantes en el proceso de meteorización química, pues segregan ácidos que actúan sobre el material parental en el cual crecen, disolviendo algunos de sus componentes, con la consecuente desintegración de las rocas.
- La posición en el terreno al dar entrada y salida de materia.

a) *Elaboración del mapa de grados de meteorización química*

La determinación de los diferentes grados de meteorización química de las partes media y alta de la cuenca del Río Mucujepe dependió fundamentalmente de los tipos de unidades lito-estratigráficas y la litología dominante en las mismas, también de los valores de temperatura media anual, los valores de precipitación media anual, las zonas de vida presentes en la cuenca y los rangos altitudinales que existen en cada unidad lito-estratigráfica de la cuenca en cuestión.

La Tabla 3.27 describe los valores de las variables consideradas para determinar los grados de meteorización química de la cuenca en estudio y su respectivo valor de ponderación de la susceptibilidad a la erosión hídrica. Tomando en consideración todas estas variables se determinaron los grados de meteorización química existentes en la cuenca media y alta del Río Mucujepe (véase Figura 4.13).

Tabla 3.27. Grados de meteorización química presentes en la parte media y alta de la cuenca del Río Mucujepe.

Edad/Unidad lito-estratigráfica	Litología dominante	Altitud (msnm)	Temp. media anual (°C/año)	Piso térmico	Precipitación media anual (mm/año)	Provincia de humedad	Zona de vida	Grado de meteorización química
Precámbrico/Asoc. Sierra Nevada	Gneis (1), esquistos (1) y granitos (1).	1.000-1.800	23-18	Macromesotérmico	1.700-1.600	Húmeda-perhúmeda	Bh-P	Alto-Moderado
Triásico-Jurásico/La Quinta	Areniscas rojas (2), lutitas rojas (4) y conglomerados (2).	1.800-2.600	18-14	Mesotérmico	1.600-1.500	Húmeda	Bh-Mb	Moderado-Bajo
Terciario/Río Negro	Areniscas (1) y conglomerados (2).	1.000-1.800 1.800-2.600	23-18 18-14	Macromesotérmico Mesotérmico	1.700-1.600 1.600-1.500	Húmeda-perhúmeda Húmeda	Bh-P Bh-Mb	Alto-Moderado Moderado
Cretácico/Apón	Calizas (1) y lutitas (2).	1.000-1.800 1.800-2.600	23-18 18-14	Macromesotérmico Mesotérmico	1.700-1.600 1.600-1.500	Húmeda-perhúmeda Húmeda	Bh-P Bh-Mb	Alto-Moderado Moderado
Terciario/Aguardiente	Areniscas (1) y lutitas negras (2).	1.000-1.800 1.800-2.600	23-18 18-14	Macromesotérmico Mesotérmico	1.700-1.600 1.600-1.500	Húmeda-perhúmeda Húmeda	Bh-P Bh-Mb	Alto-Moderado Moderado
Cretácico/Capacho	Lutitas negras (3) y calizas (1).	1.000-1.800 1.800-2.600	23-18 18-14	Macromesotérmico Mesotérmico	1.700-1.600 1.600-1.500	Húmeda-perhúmeda Húmeda	Bh-P Bh-Mb	Alto-Moderado Moderado
Cretácico/La Luna	Calizas negras (1) y lutitas negras (2).	1.000-1.800 1.800-2.600	23-18 18-14	Macromesotérmico Mesotérmico	1.700-1.600 1.600-1.500	Húmeda-perhúmeda Húmeda	Bh-P Bh-Mb	Alto-Moderado Moderado
Cretácico/Colón	Lutitas negras (4) y calizas (1).	1.000-1.800 1.800-2.600 2.600-3.000	23-18 18-14 14-12	Macromesotérmico Mesotérmico Mesomicrotérmico	1.700-1.600 1.600-1.500 1.600-1.500	Húmeda-perhúmeda Húmeda Húmeda-perhúmeda	Bh-P Bh-Mb Bmh-M	Alto-Moderado Moderado Bajo
Terciario/Palmar	Areniscas (2) y lutitas blancas (3).	1.000-1.800	23-18	Macrotérmico	1.800-1.700	Húmeda-perhúmeda	Bh-P	Alto-Moderado
Terciario/Isnotú	Arcillas, areniscas (2) y Limonitas (3).	0-1.000	27-23	Macrotérmico	1.800-1.700	Perhúmeda	Bh-T	Alto

Edad/Unidad lito-estratigráfica	Litología dominante	Altitud (msnm)	Temp. media anual (°C/año)	Piso térmico	Precipitación media anual (mm/año)	Provincia de humedad	Zona de vida	Grado de meteorización química
Terciario/Betijoque	Arcillas claras (3) y conglomerados (2).	0-1.000	27-23	Macrotérmico	1.800-1.700	Perhúmeda	Bh-T	Alto
Cuaternario /Terrazas-Conos	Conglomerados en general (2), areniscas (2), cuarcitas (2) y filitas (2).	0-1.000	27-23	Macrotérmico	1.900-1.800	Perhúmeda	Bh-T	Alto

b) Ponderación de los grados de meteorización química

Para obtener las ponderaciones de los grados de meteorización química se superpusieron en IDRISI, versión 3.2, el mapa geológico, del cual se consideró solamente las unidades lito-estratigráficas, el mapa de isotermas al relieve, el mapa de isoyetas extremas y mapa de zonas de vida de la cuenca según Holdridge. La superposición espacial de estos cuatro mapas dio origen a la clasificación presentada en la Tabla 3.27, a ilustrar en la Figura 4.14.

La escala utilizada para dar pesos o ponderaciones fue de 1 a 4, representando el 1 baja susceptibilidad a la erosión hídrica y 4 muy alta susceptibilidad a la erosión hídrica. En la Tabla 3.28 se muestra la calificación asignada a los diversos grados de meteorización química encontrados en la cuenca media y alta del Río Mucujepe. En el mapa de grado de meteorización química ponderado (Figura 4.14) se ilustran los diferentes tipos de susceptibilidad a la erosión hídrica de los grados de meteorización química de la cuenca media y alta del Río Mucujepe, y la correspondiente calificación asignada a los mismos.

Tabla 3.28. Asignación de pesos a los grados de meteorización química en la cuenca media y alta del Río Mucujepe.

Rango de altitud (msnm)	Temperatura (°C/año)	Piso térmico	Provincia de humedad	Zona de vida	Grado de meteorización química	Susceptibilidad a la erosión
0-1.000	(27-23)	Macrotérmico	Perhúmeda	Bh-T	Alto	4
1.000-1.800	(23-18)	Macro-mesotérmico	Húmeda-perhúmeda	Bh-P	Alto-moderado	3
1.800-2.600	(18-14)	Mesotérmico	Húmeda	Bh-Mb	Moderado	2
2.600-3.000	(14-12)	Meso-microtérmico	Húmeda-perhúmeda	Bmh-M	Bajo	1

La superposición espacial de los mapas de intensidades máximas ponderadas (Figura 4.9), isotermas al relieve ponderado (Figura 4.11), zonas de vida ponderadas (Figura 4.12) y grados de meteorización química ponderados (Figura 4.14) dio como resultado el componente morfobioclimático de la cuenca ponderado (Figura 4.15), tercer componente del modelo matemático de erosión potencial, todos estos productos cartográficos serán ilustrados en el Capítulo IV (Resultados y discusión).

b.4. Componente de utilización de la tierra.

Según Barrios (1997) el factor cobertura de la superficie del terreno es otro factor que influye en la erosionabilidad de los suelos o susceptibilidad del mismo a la erosión; según este autor la cobertura del terreno por la vegetación se manifiesta de dos maneras: a) la cobertura del dosel de las plantas y b) el material en contacto con la superficie del terreno.

Pese a que la cobertura del dosel de las plantas no da una cubierta completa y algunas gotas de lluvia pasan y golpean directamente la superficie del terreno provocando desprendimiento, reduce la velocidad del flujo superficial y por tanto su fuerza de arrastre y desprendimiento de partículas del suelo, lo que reduce la erosión en los mismos. El material en contacto con la superficie del suelo (mulch, residuos de las plantas y vegetación herbácea densa) es más efectivo que el dosel de las plantas para reducir la erosión (Barrios, 1997).

Entre las funciones principales que tiene la vegetación según Barrios (1997) están: 1) disipar la energía de la gota de lluvia y evitar el impacto directo en el suelo, reduciéndose así la erosión y 2) interceptar parte del volumen de agua que precipita y favorecer la infiltración del agua en el suelo, en consecuencia reduce la escorrentía, por lo que hay menos erosión.

Con este componente se trata de medir o cuantificar la incidencia humana sobre el medio natural, su efecto y su distribución espacial.

a) Elaboración del mapa de componente de utilización de la tierra

El componente de utilización de la tierra de la cuenca en estudio está conformado por tres mapas: (1) Mapa de vegetación y uso actual de la tierra, (2) mapa de focos erosivos actuales y (3) mapa de tres rangos porcentuales de pendiente.

(1) El mapa de vegetación y uso actual de la tierra de la cuenca media y alta del Río Mucujepe constituye parte tanto del modelo matemático de erosión actual así como también del modelo matemático de erosión potencial, por lo que su elaboración fue explicada en el modelo de erosión actual (Aparte 3.3.2.). La ilustración del mismo la presenta la Figura 4.1, cual muestra los once tipos de vegetación y uso actual de la tierra correspondiente a las partes media y alta del Río Mucujepe.

(2) Al igual que el mapa de vegetación y uso actual de la tierra, la elaboración del mapa de focos erosivos actuales de la cuenca (Figura 4.3) también fue explicado en el modelo matemático de erosión actual de la cuenca (Aparte 3.3.2.).

(3) El tercer elemento que conforma el componente de utilización de la tierra ponderado (CUT) es el mapa de los tres rangos porcentuales de pendiente (Figura 4.16), considerado de suma importancia

para ponderar a este componente. El procedimiento metodológico seguido para elaborar este mapa fue el mismo que el del mapa de los cuatro rangos de pendiente explicado en el Aparte 3.3.2.

b) Asignación de pesos al componente de utilización de la tierra

Señalada la influencia que la vegetación ejerce en el proceso de erosión hídrica del suelo, López (1968) definió un coeficiente que da una idea acerca del grado de protección hidrológica de la cubierta vegetal del suelo. Las tablas 3.29 y 3.31 califican los tipos de vegetación y uso actual de la tierra, utilizando para ello tres elementos: Los tipos de vegetación y uso actual de la tierra, la erosión actual y la pendiente presente en cada tipo de vegetación. Estos tres elementos, en el presente trabajo de investigación, corresponden a:

- 1) Los tipos de vegetación y uso actual de la tierra (*tut*), logrados con el mapa del mismo nombre,
- 2) las categorías obtenidas del mapa de focos erosivos actuales (*FE*) y 3) los rangos porcentuales de pendiente: < 12%, 12-30% y > 30 % (*p* %), rangos recomendados por el citado autor.

Los tres rangos porcentuales de pendiente utilizados representan: 1 = < 12 % (pendiente inferior a la de iniciación de la erosión), 2 = 12-30 % (pendiente comprendida entre la iniciación de la erosión y la de arrastre total) y 3 = > 30 % (pendiente superior a la de arrastre total), tal como se aprecia en la Figura 4.16.

La ecuación matemática que define el componente de utilización de la tierra (*CUT*) es:

$$CUT = \{ (tut) \cap (FE) \cap (p\%) \}$$

Mediante la superposición espacial en el SIG de estos tres mapas se obtuvo el mapa del componente de utilización de la tierra ponderado (*CUT*), Figura 4.17, la cual presenta cuatro magnitudes de susceptibilidad a la erosión hídrica (baja, moderada, alta y muy alta).

El procedimiento metodológico seguido para la asignación de pesos al componente de utilización de la tierra (*CUT*) fue el siguiente:

Cada especie vegetal brinda una protección particular, pero en esta investigación se necesita un coeficiente o índice que califique el grado de protección que ofrecen las formaciones vegetales (bosque, pastizales, etc.), por lo que se cuenta con el índice asignado a cada formación vegetal por López (1964), López (1968) y Mintegui, García y Robredo (1993).

López asigna un índice de protección hidrológica o un grado de resistencia a la erosión que ofrece o brinda el terreno según las diversas formas de vegetación que sobre él se asientan, considerando además de la naturaleza de la cubierta vegetal (las clases o tipos de las mismas), los rangos porcentuales de pendiente y la presencia o ausencia de erosión o degradación en las mismas. La Tabla 3.29 describe y la Tabla 3.30 cuantifica el grado de protección que cada tipo de vegetación y uso actual de la tierra brinda al suelo, en una primera versión de López (1964). La Tabla 3.31, citada por Mintegui, García y Robredo (1993), describe y califica, en una versión más actualizada del mismo autor, el grado de protección que cada tipo de vegetación y uso actual de la tierra brinda al suelo.

Tabla 3.29. Descripción del grado de protección que ofrece al suelo cada tipo de cobertura vegetal (López, 1964).

Símbolos	Tipo de cobertura vegetal	Índice de protección que brinda al suelo
	<i>Vegetación leñosa</i>	
1a	Bosque densos (Sin erosión del suelo).	1,0
1b	Bosques claros (Densidad 0,3-0,7 con sustrato herbáceo denso).	0,8-0,9
1c	Bosques claros con sustrato herbáceo degradado y erosión importante.	0,4-0,6
2a	Matorral (Monte bajo) sin erosión del suelo.	0,8-0,9
2b	Matorral degradado, con erosión aparente del suelo.	0,4-0,5
	<i>Vegetación herbácea</i>	
3a	Pastizales completos de plantas vivaces sin erosión del suelo.	0,8-0,9
3b	Pastizales degradados de plantas vivaces con erosión aparente.	0,4-0,5
3c	Pastizales anuales completos con indicio de erosión aparente.	0,6-0,7
3d	Pastizales anuales degradados con erosión aparente.	0,3-0,4
4	Terrenos totalmente erosionados y desnudos.	0,0
	<i>Tierras cultivadas</i>	
5a	Cultivos anuales sobre terrazas.	0,7-0,8
5b	Cultivos anuales sin terrazas.	0,2-0,4
6	Cultivos de plantas leguminosas forrajeras.	0,6-0,8
7a	Huertos sobre terrazas.	0,8-0,9
7b	Huertos sin terrazas.	0,5-0,6
8	Terrenos llanos o casi llanos.	1,0

Tabla 3.30. Calificación de los índices de protección (López, 1964).

Índice de protección total	Símbolo	Descripción
1	V1	Excelente
0,8-0,99	V2	Bien
0,6-0,79	V3	Suficiente
0,4-0,59	V4	Mediano
0,2-0,39	V5	Deficiente
0,0-0,19	V6	Sin protección
0,0	V7	Descubierto

Algunas consideraciones hechas por López (1964; 1968) referente al grado de protección de las diferentes coberturas vegetales son las siguientes:

La acción protectora de los bosques al suelo es la más eficaz, tanto por la acción amortiguadora que ejercen sus copas como por la profundidad que alcanzan sus raíces por sus entramados que protegen al suelo ayudando a no disgregarse, sumado a esto la protección que brindan los sotobosques que crecen bajo ellos.

La vegetación arbustiva ejerce un gran protección al suelo, primero, por su densidad de cobertura y, segundo, por su complejo sistema radical que frena la escorrentía superficial muchas veces más que los árboles.

La combinación adecuada de árboles y arbustos proporciona la completa protección al suelo por su suficiente densidad de cobertura, para cualquier valor de pendiente.

La vegetación herbácea bien conservada protege suficientemente el suelo, pero en terrenos con pendientes inferiores al 30 %, es decir, pendientes que no excedan el arrastre total.

En terrenos agrícolas el grado de protección variará según el tipo de cultivos y la forma de su explotación. En estos terrenos el suelo está constantemente siendo removido, lo que lo hace más favorable a la erosión. Los pastizales en terrenos con pendientes suaves brindan muy buena protección al suelo de la erosión, contrario a lo que ocurre en terrenos con pendientes fuertes.

Tabla 3.31. Descripción y calificación de los índices de protección (Mintegui, García y Robredo, 1993).

Tipo de vegetación	Estado de la vegetación	Pendiente	Índices
FORESTAL	Masas arbóreas densas (densidad $\geq 0,7$).	Para cualquier pendiente.	1,0
	Masas arbóreas de densidad inferior a 0,7 con sustrato arbustivo o herbáceo no degradado.	Para cualquier pendiente.	1,0
	Masas arbóreas de densidad inferior a 0,7 con sustrato arbustivo o herbáceo degradado.	3	0,4
		2	0,8
		1	1,0
	Vegetación arbustiva no degradada.	Para cualquier pendiente.	1,0
	Vegetación arbustiva degradada.	3	0,2
		2	0,6
		1	0,8
	Pastizales bien conservados.	Inferior al 30 %.	0,9
Superior al 30 %.		0,6	
Pastizales degradados.	Para cualquier pendiente.	0,3	
AGRÍCOLA	Cultivos agrícolas sin prácticas de conservación.	3	0,0
		2	0,5
		1	0,9
	Cultivos agrícolas con prácticas de conservación.	1 y 2	1,0
		3	0,3
TERRENOS DENUDADOS		3	0,0
		2	0,5
		1	0,9

De la combinación de las tablas 3.29, 3.30 y 3.31 y con algunos ajustes en función de las características y los tipos de vegetación presentes en las partes media y alta de la cuenca del Río Mucujepe, se obtuvo la Tabla 3.32, en la cual, atendiendo las variables involucradas, se asignan los pesos o calificaciones a los diferentes tipos de vegetación de la cuenca.