



Manejo de Cuencas Hidrográficas

Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales

Universidad Nacional de La Plata

Tesis

Título:

**ESTIMACIÓN DE LA EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LA ESCORRENTÍA SUPERFICIAL EN
DISTINTAS CONDICIONES DE USO DEL SUELO**

EN LA CUENCA DEL ARROYO ITACARUARE.

Provincia de MISIONES, ARGENTINA.

Autor: Ing. Ftal. Romero Lucía

Director: Ing. Ftal. Ms. Fernanda Julia Gaspari

INTRODUCCIÓN

La carencia de restricciones en el uso de los recursos naturales, junto con una tecnología de alta capacidad de transformación, a menudo inadecuada o el abuso de prácticas agrícolas, como la labranza del suelo, en ambientes inestables, provocan una degradación generalizada en diversos ecosistemas agrícolas, que en forma global podría calificarse como desertificación (Gastó, 1993). Por otra parte existe una subutilización de los recursos existentes por desconocimiento del problema o por no contar con el apoyo para el diseño de un mejor sistema de cultivo que merme la fragilidad.

Entre los procesos que contribuyen a este fenómeno pueden citarse la erosión, la acidificación y el deterioro físico de los suelos. De estos procesos, la erosión del suelo por escurrimiento hídrico, cuyo origen está en la acción del agua sobre una superficie desprovista de cobertura vegetal, es quizás el más importante de todos, dado que es irreversible y generalmente de gran magnitud (Honorato *et al*, 2001).

El tipo y la densidad de la cubierta del suelo pueden influir en la infiltración y en la tasa de evaporación. La cubierta vegetal es también un factor no estructural para contrarrestar los problemas de movimiento del agua superficial, de la erosión del suelo y del control de inundaciones (Cavelier *et al.*, Op. Cit. 2000).

Las alteraciones en sitios forestales, como ser aprovechamiento, desmonte, incendio, tala rasa, introducción de ganado, también generan degradación, ya que pueden modificar y/o acelerar el movimiento del agua dentro del sistema. El aumento en el manto acuífero asociado con la destrucción o eliminación de una cubierta forestal contribuye al flujo torrencial disminuyendo el potencial de almacenamiento de agua en el suelo (Pritchett, 1991).

Algunos ejemplos de los efectos de la tala de un bosque maduro o la alteración del grado o tipo de cubierta han sido estudiados de manera sumaria. Los aumentos de caudales totales de una cuenca acuífera, son del todo posibles. Existe la posibilidad de disminuir las reservas de agua a través del manejo forestal y también de aumentarlas (Pritchett, 1991).

Los suelos de los bosques tropicales de tierras bajas son muy permeables, permitiendo un rápido drenaje, incluso durante fuertes períodos de lluvias donde la tasa de infiltración en bosques primarios es tan alta, que menos del 1% de la precipitación se escurre por encima de la superficie del suelo (Cavelier *et al.*, 2000).

Los procesos de conversión de bosques a pastizales producen un aumento en el contenido de agua en el suelo y una mayor escorrentía anual, pues se disminuye la pérdida de agua hacia la atmósfera por evapotranspiración (intercepción) y transpiración (Cavelier *et al.*, 2000).

Durante el proceso de reforestación, la transferencia de agua del suelo a la atmósfera tiende a restablecerse, como resultado de un aumento en el follaje desde el cual se dan los procesos de evaporación del agua de intercepción y de evaporación a través de los estomas.

Por esa razón, como consecuencia de la reforestación, el contenido del agua en el suelo y la escorrentía disminuyen (Cavelier *et al*, Op. Cit. 2000).

Este efecto hídrico puede ser evaluado a partir de la cuantificación de la escorrentía y la relación entre el estado de cobertura vegetal presente y las precipitaciones actuantes.

Otro factor antrópico a considerar, es la construcción inadecuada de caminos, la perturbación excesiva del suelo y de la cubierta edáfica durante la cosecha, la compactación del suelo que llevan a cabo los troncos y la maquinaria pesada, así como las técnicas de labranza intensiva del campo, son todas operaciones que influyen y modifican la infiltración y el escurrimiento (Pritchett, Op. Cit. 1991).

ANTECEDENTES

Según Ligier (2002), en Misiones se combinan factores predisponentes a la generación de escorrentía, como la ocurrencia de lluvia intensas, pendientes acentuadas y cobertura de floresta o monte húmedo (protectora de capa arable) con la importancia que establece la extracción indiscriminada de madera.

El sector forestal misionero muestra en los últimos años un desarrollo activo y creciente, tanto por la presencia de aserraderos, como por el incremento de la superficie forestada, sobre todo con los pequeños productores apoyados por diferentes instituciones del medio.

A partir de la puesta en marcha de la Ley 25.080 (Ley de Inversiones para Bosques Cultivados), en el año 2000, se plantea que los proyectos forestales a implementarse deben llevar el correspondiente Estudio de Impacto Ambiental (EIA). La provincia de Misiones, actualmente, a través del Ministerio de Ecología y Recursos Naturales Renovables (M.E. y R.N.R.), convocó a representantes de instituciones privadas y públicas (intendentes, técnicos y dirigentes), para destacar la importancia de los EIA y planteó que, para el caso de los pequeños productores agrupados los EIA, deberían enfocarse sobre la base de estudios de cuencas hidrográficas. Simultáneamente, la provincia promueve la implementación de un Plan Maestro Forestal de Desarrollo Local en el ámbito municipal, considerando el marco del Plan Maestro Forestal Provincial.

En esta línea, el Municipio de Leandro N. Alem con la participación de diferentes actores sociales, propone en su plan estratégico la necesidad de promover el control y la protección del medio ambiente, procurar el ordenamiento territorial para alcanzar un desarrollo sostenible, basados en un correcto estudio de cuencas hídricas y lograr una zonificación rural a fin de mejorar la calidad de vida de los pobladores del municipio.

El Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), en Misiones, define como prioritarias, las temáticas de apoyo al pequeño productor y a la protección ambiental en su Plan Tecnológico. En relación a ello, la Estación Experimental Agropecuaria del INTA Cerro Azul desarrolla en el sector rural, diferentes tipos de proyectos y/o programas de apoyo al pequeño productor, así como también un proyecto específico de recursos naturales en el ámbito provincial.

En la década del 40, se iniciaron experiencias tendientes a identificar los daños causados por la erosión hídrica, tanto en la Estación Experimental de Loreto como en la Estación Experimental del INTA en Cerro Azul (Ligier, 2002).

A partir de esas líneas de acción, se consiguió que en la década de 1950, la CRYM (Comisión Reguladora de la Yerba Mate) estableciera como obligatorio que las plantaciones de nuevos yerbales fuesen realizadas en curvas de nivel. Durante el mismo período, las acciones tendientes a disminuir los daños por erosión hídrica se iniciaron con cierta continuidad, destacándose las bondades de las terrazas con desagües y su mantenimiento.

El trabajo más completo sobre erosión en Misiones, fue realizado por Gruner (1955), en el cual se resume una gran cantidad de observaciones y estudios, en muchos casos tomados de

datos básicos en el período 1928-1933. A las prácticas ingenieriles, se suma la recuperación de los suelos mediante cubiertas verdes invernales en los cultivos de Yerba Mate (Ligier, 2002).

Los primeros esquemas predictivos de pérdidas de suelos, en Mesopotamia, basados en la aplicación de la Ecuación Universal se llevaron a cabo en el NE de Corrientes. Posteriormente, con el avance de los estudios sobre el concepto de erosión hídrica potencial, se realizó la zonificación del país en clases de erosión, donde la provincia de Misiones se incluía íntegramente en la clase Muy Alta de pérdidas de suelo. (Ligier, 2002).

En relación a los estudios de escorrentía en bosques subtropicales misioneros, los mismos están en una etapa inicial de desarrollo, los cuales son el punto de partida de la presente tesis.

FUNDAMENTACION DE ELECCIÓN DEL TEMA

De acuerdo a la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO, 1978), tan solo el once por ciento de las tierras del planeta, excluyendo el continente antártico, no presenta limitaciones importantes a la agricultura; el resto padece de problemas tales como sequía, deficiencias nutritivas o toxicidades, poca profundidad, mal drenaje, o localización en áreas donde las bajas temperaturas imposibilitan la agricultura. Lamentablemente de ese porcentaje de tierras aptas, se pierde un buen lote de manera continua, debido al avance de procesos tales como la degradación de los suelos y la urbanización.

La acción del hombre puede aumentar o disminuir esa resistencia natural de la tierra a esas fuerzas degradantes. De aquí que la velocidad actual de degradación sea determinada por la manera en que el uso actual de la tierra modifica al equilibrio entre la agresividad del clima y la resistencia de la tierra (FAO/PNUMA/UNESCO, 1980).

En la actualidad, la presión del hombre sobre los recursos naturales es tan fuerte que su efecto sobre las características del medio, pueden, y de hecho lo hacen, que un ecosistema cambie por completo y su respuesta varíe en perjuicio del hombre.

A partir de estos hechos, es que se inició la difusión del enfoque de manejo a nivel de cuenca hidrográfica, siguiendo la aplicación de la ordenación, la planificación y la operación de proyectos tendiendo al desarrollo sustentable de los recursos naturales. En este enfoque viene implicado el reconocimiento de las relaciones entre suelo y agua y entre las superficies aguas arriba y aguas abajo, y la aplicación ulterior de prácticas adecuadas.

Las cuencas hidrográficas son unidades físicas que sirven como marco práctico y objetivo para la planificación y gestión del desarrollo sostenible. Toda cuenca hidrográfica, como sistema, está constituida por un conjunto de componentes que están conectados e interactúan formando una unidad (Gaspari, 2000).

Una cuenca hidrográfica se define físicamente como una unidad hidrológica territorial natural compuesta de un área de drenaje interrelacionada, con un curso colector común de agua. Sus límites se conocen como divisoria de aguas, es decir, la precipitación que cae en lados opuestos de una divisoria de aguas fluye a una cuenca diferente. En la misma están contenidos los recursos naturales básicos para las múltiples actividades humanas, como agua, suelo, vegetación y fauna. Todos mantienen una continua y particular interacción entre ellos y con los aprovechamientos y desarrollos productivos del hombre (Henaos, 1988; López Cadenas de Llano, 1998).

La cuenca es más que una unidad hidrológica, es al mismo tiempo un organismo cultural, económico y socialmente interdependiente y su planificación y desarrollo debe atender debidamente a este aspecto (FAO, 1971; Henaos, 1988; López Cadenas de Llano, 1998).

El suelo en una cuenca hidrográfica constituye un sistema importante debido a que la mayor parte de la producción alimentaria mundial depende de ellos. Debido a que existen

suelos que cubren la superficie terrestre que no son aptos para la explotación agrícola, esto manifiesta que todas las tierras que si son aptas, son destinadas a esa actividad no siempre con un control sustentable.

El suelo es la parte de la cuenca donde se cumplen todos los procesos del ciclo hidrológico luego que las aguas meteóricas han tomado contacto con la superficie terrestre. Es el piso donde quedan impresas todas las influencias causadas por fenómenos naturales, como las debidas a los impactos producidos por el hombre. El suelo es un cuerpo poroso muy complejo formado por partículas minerales, materia orgánica, agua y aire que se presentan en tres fases: sólida (materia orgánica y materia mineral), líquida (agua de constitución y agua almacenada) y gaseosa (aire y vapor de agua) (Mármol, 2006).

Las condiciones de humedad inherentes al suelo, a la topografía y al clima de la región no pueden alterarse fácilmente por medio del manejo. No obstante, ciertas facetas del ciclo hidrológico pueden ser influenciadas de manera provechosa a través del manejo de las cuencas acuíferas (Pritchett, 1991).

Mármol (2006) menciona que entre muchas propiedades que caracterizan el suelo, algunas son de especial importancia para la hidrología de la cuenca y para su manejo y control de la degradación.

El riesgo natural a la degradación de una cuenca está definido por el control del equilibrio existente entre la agresividad del clima y la resistencia natural del suelo al ataque de dicha fuerza.

La fragilidad del suelo y/o la susceptibilidad al deterioro superficial, producto de eventuales desequilibrios en las variables geomorfológicas, climáticas y ambientales, expresan la posibilidad de sufrir alteraciones que pueden determinar efectos adversos en su productividad potencial.

Estos procesos de degradación se manifiestan según las características intrínsecas de estabilidad y resistencia mecánica del suelo, o bien, de la fragilidad que puede presentar producto de la interacción de factores como la profundidad arraigable del suelo, textura del grupo de suelos al cual pertenece cada situación, el contenido de humedad del suelo al momento de la realización de las actividades de manejo, drenaje interno, la densidad aparente del suelo y la distribución de poros, el contenido de materia orgánica, tipo y estado del material generador, pedregosidad superficial en la cuenca. (Honorato *et al.*, 2001).

Por otro lado existen atributos como la pendiente y disección del terreno, exposición, altitud, longitud de las laderas, contorno topográfico, la intensidad de las precipitaciones y erosividad de las lluvias, que inciden en los procesos de degradación del suelo, configurando un nivel de vulnerabilidad a la degradación y frente al cual debe considerarse medidas de prácticas que garanticen la conservación de los atributos principales del componente ambiental y de la productividad de los bosques nativos (Honorato *et al.*, 2001).

De los elementos del medio físico, el clima y particularmente la lluvia es el agente activo en la degradación de los suelos por escorrentía superficial que conlleva a la erosión hídrica. Así

cuando se produce un evento de lluvia de apreciable magnitud, el impacto ejercido por las gotas origina la desagregación y dislocación de los minerales orgánicos y minerales del suelo, se rompe su equilibrio natural y se produce la pérdida de la capa superficial como resultado de la agresividad climática y de la susceptibilidad del suelo a la erosión (Colotti, 2004).

Ganoso (2001), expresa que los procesos de degradación de los suelos se pueden agrupar según las propiedades afectadas en:

- físicos: erosión, compactación, deslizamiento, remoción y amasado.
- químicos: alteración del balance nutricional y formación de materia orgánica, contaminación
- biológicos: alteración de poblaciones de microorganismos.
- hídricos: afectación de la disponibilidad y movimiento del agua en el suelo, fluctuaciones del nivel freático

En relación a la degradación hídrica se establece que cuando el agua de precipitación llega a la superficie del suelo escurriéndose por el suelo y desde el follaje a lo largo de los troncos, pasa de nuevo a la atmósfera (por transpiración) o evaporación, sirviendo para alimentar el caudal de quebradas y ríos (Cavelier *et al.*, 2000).

También la precipitación presenta otro movimiento vertical que forma parte de la infiltración y percolación con fluctuaciones temporales diferentes. Específicamente, el escurrimiento incrementa la erosión a causa de la reducción de las tasas de infiltración del agua en el suelo, y por lo tanto al incrementar el escurrimiento se reduce el almacenamiento de agua en el suelo. Por otra parte, se genera un déficit de agua disponible en el suelo para el desarrollo vegetal, provocando menor crecimiento de las plantas, que significa menor cantidad de residuos vegetales. Además cuando se presenta menos vegetación y residuos proveen se establece una menor cobertura protectora, lo cual incrementa la erosión.

La experiencia mundial demostró que las soluciones para los problemas de degradación por erosividad de las precipitaciones que se originan en conjunto con el manejo inadecuado de los recursos naturales que afectan seriamente la capacidad productiva de los sistemas agrícolas y, que repercuten a mediano y largo plazo en la calidad de vida de los habitantes, se basan en un enfoque más preciso para comprender y resolver dichos problemas que es tomando como unidad de gestión el “sistema cuenca hidrográfica” (García Nájera, 1962; Mintegui Aguirre y López Unzú, 1990).

Considerando el análisis a nivel de la Cuenca del Arroyo Itacaruaré, la presente tesis genera un estudio específico que analiza la erosividad de las precipitaciones en función de la intensidad, duración y distribución en el espacio, atendiendo el impacto sobre la degradación del suelo por medio de la zonificación de su erodabilidad.

HIPÓTESIS DE TRABAJO

La evaluación temporal de la escorrentía superficial, generadora de erosión hídrica, permite formular medidas conservacionistas según los diferentes usos del suelo, que reducirán los problemas de pérdidas de cultivo y bosques.

OBJETIVO GENERAL

Cuantificar la escorrentía superficial temporal bajo diferentes usos de suelos en la Cuenca del Arroyo Itacaruaré, Provincia de Misiones.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Caracterización de la Cuenca del Arroyo Itacaruaré. Provincia de Misiones.
2. Determinar la erosividad de las precipitaciones (R) para el período 1987 – 2006 en la Cuenca del Arroyo Itacaruaré.
3. Cuantificar del Índice de erodabilidad del suelo (K) para la Cuenca del Arroyo Itacaruaré.
4. Reconocer los principales usos del suelo en relación a su ubicación en el terreno.
5. Aplicar del Método Número de Curva (CN) para los diferentes usos del suelo.
6. Comprobar la variación temporal – espacial del escurrimiento superficial en la Cuenca del Arroyo Itacaruaré por medio del coeficiente de escorrentía.
7. Formulación de diferentes medidas conservacionistas para el control de la escorrentía superficial según uso actual de suelo.
8. Identificar áreas potenciales para la implementación del sistema silvopastoril como medida conservacionista en la Cuenca del Arroyo Itacaruaré.

CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE TRABAJO

1. Ubicación geográfica

El área de interés para el estudio de esta tesis es la provincia de Misiones, ubicada en el sector noreste de la República Argentina, en el centro de la cuenca del Plata (Figura 1). La actividad primaria de la provincia se sustenta en la agricultura, la explotación forestal y la silvicultura. La yerba mate ha sido el cultivo tradicional que impulsó su colonización; luego se extendieron los cítricos, el té, el tung y el tabaco.

La industria está representada por plantas procesadoras de materias primas locales: secaderos y molinos yerbateros, secaderos de té, subproductos de cítricos, aserraderos y fábricas de pasta de celulosa y papel. En el sur de la meseta, donde ésta pierde altitud en la planicie de Apóstoles, se hallan las ciudades de Apóstoles y Oberá, con importantes agroindustrias.

La actividad turística cuenta con importantes atractivos naturales y culturales. En el norte se encuentra el Parque nacional Iguazú, que constituye una reserva de la selva subtropical y cuenta con el grandioso espectáculo de las cataratas del mismo nombre. En la provincia se conservan las ruinas de las misiones jesuíticas, que constituyen otro foco de atracción, y se encuentra la Reserva natural San Antonio.



Figura 1: Mapa de ubicación del área en estudio, en la Provincia de Misiones, República Argentina.

2. Geología

El territorio de la Provincia de Misiones está formado por una meseta desprendida del sistema orográfico brasileño, con una altura máxima que supera los ochocientos metros, en el nordeste. Estructuralmente, Misiones constituye el reborde meridional del macizo de Brasilia y su forma ondulada de sierras se debe a la erosión hídrica.

Está comprendida en una subregión amesetada, Las Sierra de Misiones, conjunto montañoso de Argentina localizado en la parte central de la provincia de Misiones y cuya parte central coincide aproximadamente con el eje de la Meseta misionera (o Meseta subtropical). Sus mayores elevaciones constituyen la divisoria de aguas entre los ríos Paraná, Iguazú y Uruguay. Esta unidad se encuentra en pleno proceso morfogenético, donde las acciones de tipo fluvial, dentro de un clima Subtropical, son las más predominantes (Godagnone *et al.*, 1988).

Las Sierras de San José y del Imán o Tacuará se desarrollan en sentido suroeste-noreste, de escasa elevación (700-800 metros de altitud), esta situación origina la mayor longitud de los afluentes del Río Uruguay. La sierra se extiende en forma de arco a lo largo de unos 50 km, entre los departamentos misioneros de Leandro N. Alem y Apóstoles, y constituye un ramal más del relieve amesetado de la Mesopotamia argentina. Desde la sierra del Imán descienden varios cursos fluviales, de entre los que destaca el río Itacaruaré, afluente del Uruguay.

3. Suelo

El material originario constituyente a partir del cual se han formado los suelos en la Cuenca del Arroyo Itacaruaré es el denominado Basalto Tholeiítico de Misiones (Teruggi, 1955), sobre el cual han evolucionado las denominadas Tierra Rojas, a partir de la alteración profunda de los silicatos, predominando los óxidos de hierro, de aluminio y arcillas de neoformación retículo 1:1 (Godagnone *et al.*, 1988).

El suelo predominante es de tipo laterítico, producto de la descomposición del meláfiro con alto contenido de hierro y único en el país.

Las unidades cartográficas reconocidas en Misiones son once, representadas cartográficamente en el Mapa de Suelo Provincial. En particular, la Cuenca del Arroyo Itacaruaré corresponde a seis unidades edáficas. Según la nomenclatura de la carta de suelos de Misiones, se describen a continuación las correspondientes a la cuenca en estudio:

3) Suelos variadamente evolucionados, generalmente hidromorfos, de medianamente profundos a profundos, ácidos, pobres, derivados de sedimentos aluvionales de los arroyos principales. Asociados con suelos hidromorfos, arcillosos, de medianamente profundos a profundos, sub-ácidos, bastante fértiles, derivados de la alteración “en situ” del meláfiro.

4) Suelos poco evolucionados, superficiales sobre roca compacta, continua, muchas veces aflorante, asociados con suelos hidromorfos, derivados de basalto, medianamente profundos o profundos, ligeramente ácido bastantes fértiles.

5) Suelos jóvenes, escasamente evolucionados, medianamente profundos, fértiles, derivados de basalto alterado y fracturado hasta una discreta profundidad, fuertemente ácidos, asociados a suelos rojos profundos del conjunto 9 no separables a la escala usada

6) Suelos jóvenes poco evolucionados o evolucionados derivados de meláfiro alterado y fracturado hasta una buena profundidad (1-2 m) ligeramente ácidos, permeables, fértiles. A veces están asociados con suelos hidromorfos derivados de meláfiro, arcillosos, ligeramente ácidos, medianamente fértiles. Se distinguen dos fases: morfología llana o poco inclinada, con escaso peligro de erosión, perfil más profundo, y morfología fuertemente inclinada, con fuerte peligro de erosión, perfil superficial.

9) Suelos rojos profundos, muy evolucionados, lixiviados, arcillosos permeables, ácidos o ligeramente ácidos, medianamente fértiles, derivados de basalto y sus fases de erosión.

4. Vegetación

Desde el punto de vista fitogeográfico, la provincia posee formaciones boscosas correspondientes a la región de la Selva Misionera (Parodi, 1964), encontrándose sinonimias según diferentes autores (Ragonese, 1967; Cabrera, 1976). Dicha región incluye la provincia de Misiones y una pequeña parte del noroeste de la provincia de Corrientes.

Dentro de la Selva Misionera se distinguen los distritos de las Selvas Mixtas y el de los Campos. La vegetación de las Selvas Mixtas constituye una prolongación de la pluviselva subtropical del Brasil y Paraguay, con más de 2.000 especies conocidas de plantas vasculares, donde los árboles más altos superan los 30 m de altura, distinguiéndose cinco estratos entretnejidos por lianas y plantas epífitas (Daniele y Natenzon, 1994).

Según Cabrera (op. cit.), el distrito de las Selvas Mixtas se caracteriza por la presencia de tres comunidades climáticas: la selva de laurel (*Nectandra megapotamica*) y guatambú (*Balfourodendron riedelianum*) que forma la asociación clímax de la mayor parte de la zona, con cerca de 100 especies arbóreas la selva de laurel, guatambú y palo rosa (*Aspidosperma polyneuron*) que abarca el extremo norte de Misiones, en el Parque Nacional Iguazú la selva de laurel, guatambú y pino Paraná (*Araucaria angustifolia*) en el terreno más alto del extremo oriental de la provincia que constituye un ecotono entre las selvas mixtas y los bosques de pino del planalto del sur de Brasil.

El distrito de los Campos se extiende por el sudoeste de la provincia y está dominado por sabanas de gramíneas donde las selvas sólo aparecen en las orillas de los ríos y lagunas en forma de galerías o bien formando pequeñas isletas en lugares donde se acumula la humedad.

Según un relevamiento en el parque provincial de la Sierra "Ing. Raúl Martínez Crovetto" MEyRNR, (2002) dentro del distrito de las Selvas Mixtas se reconocen regiones de predominio de ciertas especies arbóreas que nos indican la presencia de diferentes comunidades climáticas. Las regiones climáticas corresponden a la denominada Selva del Laurel y Guatambú, la cual se alterna con una franja semicontinua de la Selva Urunday, asociado con Canela de

venado, en la región oeste. Hacia el sur, estos ecosistemas selváticos se continúan con el Distrito de los campos, presentándose como un ecotono selva-campo, se pueden observar manchones de campo natural dentro del monte y mogotes de monte dentro del campo.

Este estudio menciona que en las selvas, las comunidades presentes reflejan fisonómicamente dos subdivisiones, una comunidad florísticas dominada por especies como el Laurel negro (*Nectandra saligna*), Guatambú blanco (*Balfourodendron riedelianum*), Guayuvira (*Patagonula americana*), Anchico colorado (*Parapiptadenia rigida*), entre las de mayor frecuencia, y otra comunidad florística dominada por el Urunday (*Astroniun balansae*), y la Canela de venado (*Heliotta apiculata*).

En ambos casos la prevalencia está determinada por la calidad del suelo, ya que la primera asociación mencionada solo se registra en suelos de tipo 3, 6A y 6B por su mayor profundidad y contenido orgánico, mientras que la segunda asociación se presenta sobre suelos de tipo 4 , aunque se registran también en otros suelos (6B) de cierto afloramiento rocoso. (C.A.R.T.A., 1964).

En cambio, en los “campos”, se pueden observar al menos, tres tipos de asociaciones: una donde predominan los pajonales de *Aristida jubata*, que se vincula a los suelos de tipo 9; otra que se vincula a los suelos de tipo 4 y se extiende entre los mogotes de selvas que conforman principalmente el Urunday y la Canela de venado, en donde se encuentran algunas especies arbustivas que se destacan como el Aguaribay (*Schinus molle*), la Chilca (*Baccharis gaudichaudiana*) y el Niño rupá (*Aloysia virgata*), entre los pajonales de Espartillo (*Elynorus muticus*). Las dos comunidades descritas pertenecen a los pajonales mesófilos. Una tercera asociación de gramíneas, de tipo hidrófilo por su ubicación sobre terrenos anegados, puede ser observada en forma de manchones dentro de las selvas en zonas bajas e influidas por algún curso de agua lindante. El suelo donde se presentan estas pueden ser de tipo 3 a 6A, Un tercer tipo de asociación son las llamadas comunidades pioneras, que ocupan suelos desprotegidos por la erosión con un mínimo de materia orgánica.

La masa de monte nativo se encuentra concentrada hacia el suroeste del departamento y luego se distribuye a lo largo de los cauces de los arroyos y en áreas de elevada pendiente que dificultan su extracción.

5. Usos del Suelo

La explotación forestal fue la principal actividad económica desarrollada en la Selva Misionera entre el inicio del siglo pasado y el fin de los años de la década del 50, favorecida por la disponibilidad de grandes extensiones de selva primaria, una mano de obra abundante y poco exigente, y el transporte económico por vía natural del Paraná.

Una intensa extracción selectiva condujo al empobrecimiento de todos los bosques de la región, a excepción de algunos escasos vestigios de selva intacta en áreas poco accesibles en el norte y el este de Misiones. Esta explotación es responsable de la pérdida del valor maderable

del bosque nativo, de los árboles reproductores de especies valiosas y de una caída en sanidad y calidad del bosque. A su vez, la provincia cuenta con importantes explotaciones agrícolas.

Las actividades agropecuarias predominantes en la Cuenca del Arroyo Itacaruaré son:

- Forestaciones: El monte implantado es principalmente de *Pinus elliotti*. Existen masas forestales de diferentes edades con diferente grado de manejo silvícola (poda y raleo). En los últimos años la superficie forestada por los productores ha crecido en forma relevante.
- Cultivos industriales: yerba mate, tabaco y té.
- Cultivos anuales: Son principalmente cultivos para el autoconsumo por ejemplo: maíz, mandioca y soja, efectuados como producto alternativo de productores de tabaco.
- Ganadería: Este tipo de explotación producción productiva se realiza con ganado bovino y porcino.

La agricultura migratoria desarrolla una práctica agrícola en la región denominada “rozado”, que consiste en el desmonte del bosque nativo y el quemado de sus residuos. Los productores minifundistas realizan el rozado para la plantación de los cultivos anuales como ser; mandioca, maíz y en mayor medida, tabaco. Los productores de un perfil socioeconómico superior, habilitan tierras para forestaciones y pasturas.

El monte nativo se encuentra altamente fragmentado y un alto porcentaje es vegetación secundaria o “capuerón”. Existe también un excesivo parcelamiento, unidades medias de 25 ha además subdivididas, por debajo de la unidad económica. Este extremo uso del suelo impide la aplicación de medidas de conservación.

6. Fisiografía

La disposición hidrográfica en la Provincia de Misiones de tipo periférico hace que sea un distrito particular, con innumerables cursos propios, que nacen y terminan en el mismo territorio provincial. Existe una gran densidad fluviológica que es consecuencia del clima húmedo y del rápido escurrimiento promovido por las pendientes. Las condiciones climáticas, topográficas y edáficas son muy favorables para el escurrimiento en áreas de colinas, y por lo tanto el coeficiente de drenaje es más elevado.

La erosión fluvial ha desempeñado un rol fundamental en el diseño del relieve hidrográfico, que aún no ha llegado a su perfil de equilibrio. La poderosa erosión retrógrada ha logrado en los arroyos de Misiones un tipo de perfil longitudinal que se repite en casi todos los casos. La altura sobre el nivel del mar, la fisiografía, el grado y orientación de las pendientes, son entre otros, los factores de mayor importancia en la caracterización del lugar

7. Clima

El clima regional es el Subtropical húmedo, sin estación seca, que presenta temperaturas promedio de 20°C (-2°C en Julio hasta 40°C en verano). Las temperaturas registran variaciones de hasta 3,8°C según el relieve.

Heladas

Las heladas que se registran en la provincia de Misiones, se producen como consecuencias de la entrada de masa de aire de origen polar, continuando luego el enfriamiento debido a la pérdida de calor por irradiación que se produce en la superficie terrestre. Estos factores que conducen a las ocurrencias de heladas, por si solos son difícilmente ocasionen un descenso de la temperatura por debajo del nivel de congelamiento. En consecuencia las heladas mixtas son las que prevalecen en la región (Olinuk, 2002).

La ocurrencia de temperaturas iguales o inferiores a 0°C, en el abrigo meteorológico a 1,50 m de altura sobre el suelo, independientemente de su duración e intensidad. Ocurrieron durante el período 1967-1996 la fecha extrema de la primera helada meteorológica corresponde al 16 de mayo (año 1968) y de la última helada al 26 agosto de (año 1984), o sea un período máximo de heladas de 103 días. El período libre de heladas abarca desde el 27 de agosto hasta el 15 de mayo, totalizando 263 días (Olinuk, 2002).

Los daños que pueden ocasionar esta adversidad climática dependen de la intensidad y duración que registren las mismas, la helada más intensa se presentó en julio de 1975 con -3,9°C, en cuanto a su duración las heladas mayores de una hora se producen en el mes de julio (Olinuk, 2002).

El porcentaje de años con ocurrencia de heladas meteorológicas fue de 26% para el mes de julio y de 23% para el mes de junio. En el 50% de los años ocurrieron heladas (Olinuk, 2002).

La helada extrema que se registró a 0,05 m sobre el suelo a la intemperie, fue el día 9 de mayo de 1987 y la fecha extrema de la última el 20 de septiembre de 1995. Abarcando un período libre de heladas desde el 21 de septiembre hasta el 08 de mayo, en un total de 230 días. El período libre de heladas fue de 297 días. El 77% de los años, la primera helada se registró en el otoño y en el 23% en invierno (Olinuk, 2002).

Precipitaciones

El promedio anual de precipitaciones es de 1954,3 mm. Debido a la distribución de las lluvias y a las temperaturas de la época, las mayores deficiencias hídricas se producen a fines de la primavera y en la primera mitad del verano.

Los mayores excesos hídricos se registran en el otoño y a comienzos de la primavera. El régimen de las lluvias es de tipo torrencial con intensidades que pueden alcanzar frecuentemente 25 a 50 mm por hora y accidentalmente hasta 75 mm (Olinuk, 2002).

Debido a estas características, las lluvias son capaces de provocar serias pérdidas de suelo y constituyen una permanente amenaza a la estabilidad e integridad física de algún tipo de suelo (Godagnone *et al*, 1988).

Granizo

El granizo, de acuerdo a las observaciones realizadas en la Estación Agrometeorológica de Cerro Azul, las intensivas de las granizadas en el Observatorio Agrometeorológico del INTA y zonas de influencia, variaron entre débil y moderada, con gránulos que en la mayoría de los casos presentaron un diámetro de a 0,5 y 2 cm, mientras que la duración generalmente fue inferior a los cinco minutos. Además, el problema del granizo es que presenta características distintivas con relación a otras adversidades climáticas (Olinuk, 2002).

La ocurrencia de granizo en el segundo semestre es muy superior que en el primero, tanto en valores medios como en los máximos, mayormente en los meses de septiembre y octubre (Olinuk, 2002).

En los meses de mayo junio y julio se registraron los valores mínimos de evaporación, debido en primer término a que estos meses presentaron las temperaturas medias más bajas (Olinuk, 2002).

Los meses de enero, noviembre y diciembre presentan las medias diarias superiores a 5 mm mientras que el promedio más bajo corresponde al mes de junio con 1,8 mm (Olinuk, 2002).

Evapotranspiración Potencial (ETP) Y Real (ER)

En el gráfico 1, pueden observarse los valores medios mensuales de ETP y ER de la localidad Cerro Azul, calculados de acuerdo al método de Thornthwite y Mather (1967).

Los valores medios mensuales de EPT, variaron entre un máximo de 149 mm, ocurrida en el mes de enero y un mínimo de 35 mm, correspondientes al mes de junio.

Los valores medios mensuales de ER, presentaron un máximo de 144 mm, ocurrida en el mes de enero y un mínimo de 35 mm, registrado en el mes de junio.

Observando la variación de estas dos variables a lo largo del año, puede apreciarse que es muy notable la dependencia de estas respecto de las temperatura medias mensuales que se registran (Olinuk, 2002).

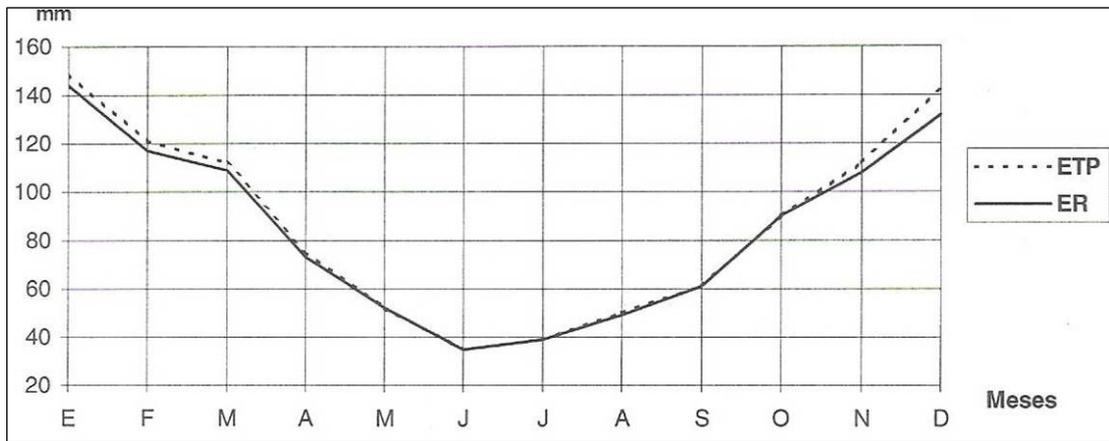


Gráfico 1: Evapotranspiraciones Reales (ETP) y Potenciales Normales (ER) registradas en Cerro Azul Período 1967-1996

Exceso y Déficit Hídrico

Son los elementos resultantes o derivados del balance hidrológico. En el gráfico 2, pueden observarse los porcentajes de los años con deficiencias y excesos, que se produjeron en la localidad de Cerro Azul durante el período 1967- 1996.

En los meses de enero, febrero y diciembre los porcentajes de años con deficiencias, no superaron 30 %. En los meses de mayo, junio y julio los porcentajes con deficiencias fueron, muy bajos, de 0 a 3 % de los años. Los porcentajes de años con excesos superaron en todos los meses el 40 %, alcanzando en el mes de junio 97 % de años con exceso. El mes de enero fue el que presentó menor porcentaje de años con excesos, 40 %. En el período de marzo a noviembre, donde se produce menor evapotranspiración debido a las temperaturas más bajas, los porcentajes de años con excesos superaron el 60 % (Olinuk, 2002).

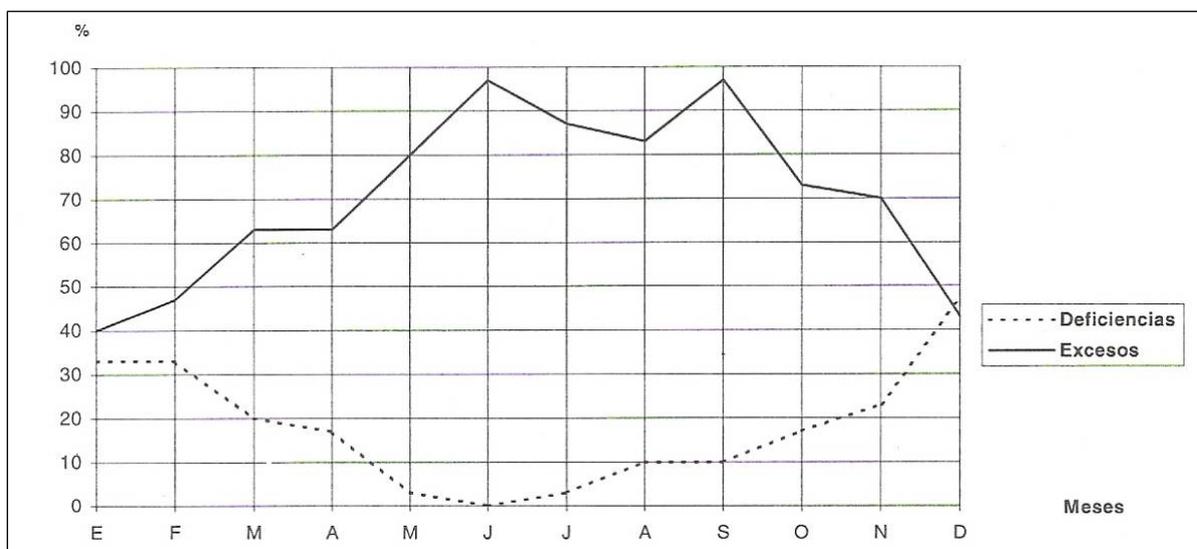


Gráfico 2: Porcentaje de años con deficiencias y excesos, registrados en Cerro Azul, período 1967-1996.

Heliofania

La luz que proviene del sol puede llegar en forma directa a la superficie terrestre, excepto que fuera interceptada por nubes, niebla o por obstáculos como montañas, vegetación, edificios etc. transformando a la misma en difusa. Se designa heliofanía (helio=sol y fanis=resplandor) al período de tiempo que en determinado lugar se registra luz directa del sol (Torres Bruchmann, 1981).

Analizando la heliofanía efectiva máxima diaria, se observa en el gráfico que en los meses de enero, noviembre y diciembre superaron la 10 hs. Los promedios fluctuaron entre 5,5 hs. heliofanía registrada en el mes de junio y 9, hs en el mes de diciembre. Los valores mínimos variaron entre 2,8 hs en el mes de mayo y 6,9 hs en los meses de diciembre y enero (Olinuk, 2002)

La heliofanía efectiva media anual fue de 7,1 hs. En el año 1978 se registro la máxima con 7,6 hs y la mínima en el año 1983 con 6,4 h. los valores anuales que presenta este elemento climático están muy relacionados con las precipitaciones anuales, coincidiendo los años de ocurrencia de sus valores extremos (Olinuk, 2002)

Humedad Atmosférica

En cuanto a la humedad atmosférica, las medidas mensuales superan el 70 % de humedad relativa desde enero hasta octubre, durante la mayor parte del año, siendo noviembre y diciembre los meses que presentaron promedios inferiores a 70%.El único mes que alcanzó 80% de humedad media fue el mes de junio (Olinuk, 2002).

Los valores de la humedad relativa media anual varían entre una mínima de 67%, registrada en el año 2978 y una máxima de 78% que se produjo en el año 1984. La humedad relativa media anual fue del 74% (Olinuk, 2002).

Vientos

Los vientos que prevalecen en la Estación Agrometereológica de Cerro Azul, es el SE. En orden decrecientes le siguen los vientos de Norte NE, sur, Noroeste, suroeste Oeste y calma (Olinuk, 2002). Los meses en que se registraron las frecuencias máximas y mínimas de las distintas direcciones se expresan en el gráfico 3.

Teniendo en cuenta los antecedentes de la Estación Agrometereológica de la Estación Experimental del I.N.T.A. de Cerro Azul, se tomaron diversos factores metereológicos, de interés para la realización de esta tesis, tales como temperaturas y precipitaciones los cuales fueron actualizados al año 2007, para su posterior análisis.

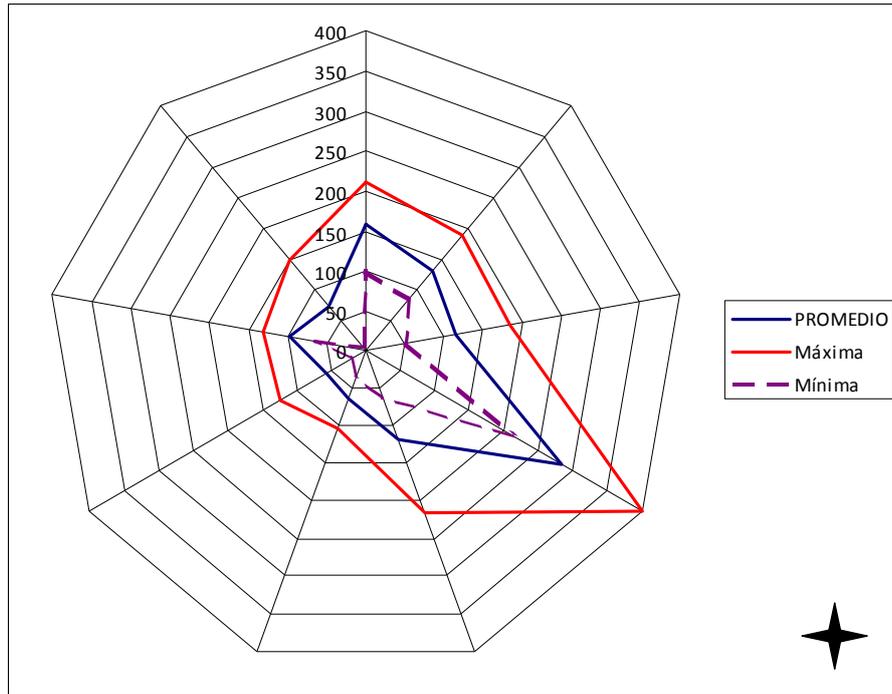


Gráfico 3: Frecuencias anuales de las distintas direcciones de viento, registradas en la localidad de Cerro Azul, período 1967-1996.

La Estación Agrometeorológica de la Localidad de Cerro Azul, está ubicada a 27° 39' Latitud Sur, 55° 26' Longitud Oeste y a 283 metros sobre el nivel del mar. Las observaciones meteorológicas que se realizan siguen las normas de la Organización Meteorológica Mundial (O.M.M.) Figura 2.

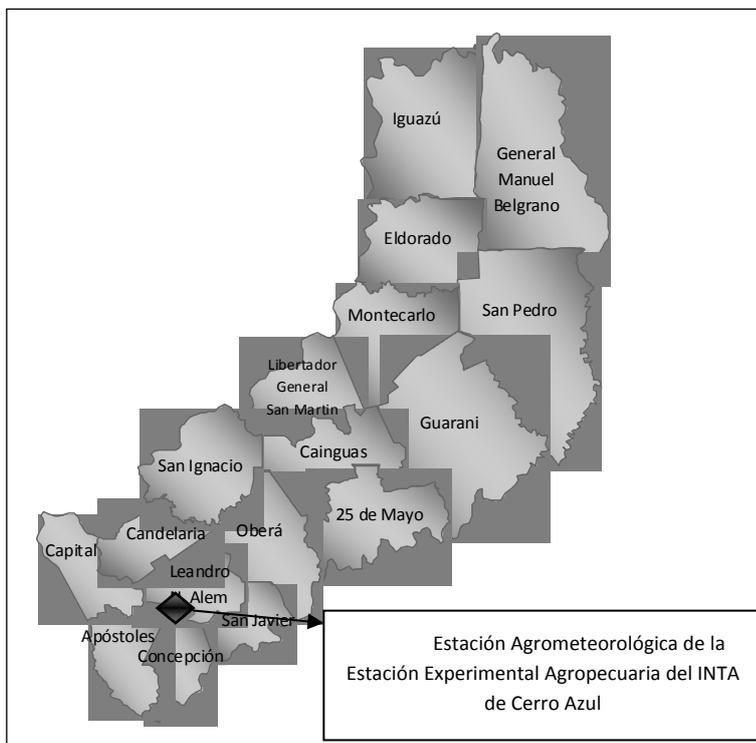


Figura 2: Mapa de ubicación de la Estación Agrometeorológica de Cerro Azul.

8. Red de drenaje

Los grandes ríos Paraná y Uruguay, prácticamente paralelos en el sentido de la mayor longitud (SO-NE), conforman los colectores principales de este sistema fluvial. La región cubre de este modo dos vertientes principales a ambos lados de la dorsal mencionada, generando un rectángulo de 300 km de largo por unos 100km de ancho.

La altimetría de la región oscila entre 350 m y 500 m, llegando a 800 m en su extremo NE, en las serranías centrales, bajando 160-200 m hacia el sur de dicha dorsal.

La disposición hidrográfica de tipo periférico hace que Misiones sea un distrito particular, con innumerables cursos propios, que nacen y terminan en el mismo territorio provincial. Existe una gran densidad fluviológica el faldeo oriental de las sierras mencionadas origina la red fluvial de los afluentes del Río Uruguay (del guaraní "Uruguá- y"= caracol de agua, es decir río de los caracoles).

El arroyo Itacaruaré tiene sus nacientes en las Sierras del Imán o Tacuará y está conformado en el sector de cabeceras por los arroyos Itacaruaré, arroyo del Medio y arroyo 25 de mayo quienes al juntarse, originan el cauce principal del arroyo Itacaruaré hasta su desembocadura.

9. Marco socio económico y estructura de tenencia de tierras

A partir del año 1.609, se instalaron las reducciones jesuíticas en diferentes zonas del sur de la provincia (San Ignacio, Santa Ana, Santa María, entre otras). La expulsión de los jesuitas en 1.767 provocó la decadencia y derrumbe de esta organización social, la que desapareció con la invasión portuguesa de 1.817 y 1.818. En 1.881 Misiones, federalizada como Gobernación Nacional, recibió inmigración brasileña y paraguaya. En 1.897, llegan inmigrantes centroeuropeos (polacos, ucranianos, suecos, finlandeses, suizos, alemanes y noruegos) y, finalizada la Primera Guerra, se reanuda el proceso con la colonización privada sobre el Alto Paraná, con predominio de alemanes y polacos. Desde mediados del siglo XX, la migración de ultramar fue remplazada paulatinamente por argentinos provenientes de otras provincias. En 1.953, después de 120 años, Misiones volvió a ser provincia. Durante los años 1.970-1.980 la migración interna tomó un fuerte auge y se incrementó hasta colocarla entre las provincias de más alto crecimiento demográfico del país y que la llevó a 790 mil habitantes (INDEC, 1998).

La Población provincial fue según el Censo 1991 de 788.915 habitantes (INDEC, 1991) (población urbana:493.417 habitantes (INDEC, 1991)), (población rural:295.498 habitantes (INDEC, 1991)). Según el Censo 2001: 963.869 habitantes (INDEC, 2001) (población urbana:672.951 habitantes (INDEC, 2001), población rural:290.918 habitantes (INDEC, 2001)). Según datos preliminares del Censo Nacional 2.001 (IPEC, 2.002), la población total de Misiones registró un aumento del 22% en 10 años. La densidad demográfica de Misiones asciende a unos 33 hab/km².

- Sector primario El mayor aporte a su economía proviene de la selva. Las principales especies explotadas son: pino Paraná (*araucaria angustifolia*), guatambú, cedro misionero, petiribí, incienso, caña fístula, anchico, y laurel güaycá. Además hay gran cantidad de forestaciones con pinos y eucaliptos. En la provincia existen viveros forestales y en Posadas se construyó una biofábrica, que clonará plantines de pinos y otros árboles, en gran cantidad, destinados a las industrias maderera, pastera y papelera. También clonará plantas de ananá y otros vegetales para cultivarlos. Otra importante fuente de recursos es la agricultura. Destacan los cultivos de yerba mate, té y, en menor medida, tabaco, caña de azúcar, algodón, arroz, maíz, café, plantas aromáticas (lemon grass o pasto cedrón, vetiver, menta japonesa y citronella), plantaciones de cítricos (mandarinas, pomelos, limones, limas y naranjas) y de sandías, frutillas, melones, duraznos, manzanas (poca cantidad), bananas, aguacates o paltas, ananás y papayas o mamones. Plantaciones de tung o aleurite, soja, vid (pequeño número), mandioca y hortalizas. La ganadería es esencialmente de bovinos. De estos, aunque se crían algunas razas de vacas se prefiere el cebú, más resistente al clima misionero. También existe un reducido número de equinos y caprinos; y la cría de cerdos se halla en expansión. La actividad ganadera no es de gran importancia en esta provincia, aunque cabe destacar que ha mejorado notablemente en los últimos años. También se desarrollan la piscicultura, la avicultura, la floricultura (con orquídeas, rosas cortadas) y la apicultura. En cuanto a la minería (muy escasa), hay algunas rocas de finalidad constructiva, basalto, cristal de roca y mínimas cantidades de manganeso. En los alrededores de Colonia Wanda y Puerto Libertad se extraen piedras semipreciosas.
- Sector secundario: La agroindustria y la industria forestal son las principales actividades del sector secundario. Hay secaderos de yerba mate y té; molinos yerbateros y maiceros; envasadoras de té; fábricas de fécula de mandioca; fábricas de almidón (a partir de la fécula de mandioca); algunas fábricas textiles y de calzado; elaboración de productos lácteos (pequeña cantidad); elaboración de medicamentos; un ingenio azucarero en San Javier; una desmotadora de algodón en Leandro N. Alem; fábricas de ladrillos; empaque o packing mecánico de frutas y verduras; manufactura de tabaco; fábricas de muebles; aserraderos; laminadoras; fábricas de conglomerados, compensados, machimbre, terciado, postes, vigas, cajones, escarbadiantes, palos de escoba y otros sub-productos de la madera; impregnación de maderas; serrerías; carpinterías; elaboración de dulces regionales, mermeladas y jaleas; algunos frigoríficos y mataderos; fabricación de autopartes; la vitivinicultura (elaboración de vinos) se desarrolla artesanalmente en Cerro Azul; elaboración de jugos y concentrados (a partir de cítricos); algunas metalúrgicas; pequeñas plantas de destilación y rectificación de aceites esenciales (aromáticos), que se usan para saborizar alimentos y en perfumería (industrias inexistentes en la provincia); elaboración de aceite de aleurite o tung, utilizado para fabricar pinturas (no se fabrican aquí); destilación de otros aceites; algunas fábricas de pastas; fábricas de embutidos; carbonerías; algunas pequeñas industrias dedicadas al cuero y fábricas de pasta celulósica y de papel.

MATERIALES Y MÉTODOS

A los fines de su estudio y análisis de la escorrentía superficial temporal bajo diferentes usos de suelos en la cuenca del Arroyo Itacaruaré, Provincia de Misiones, se subdivide a la cuenca en subcuencas más pequeñas y homogéneas. Cada cuenca es única en el mundo, como una impresión digital. En consecuencia, la generalización es posible, hasta cierto punto, puesto que las mismas leyes físicas se aplican en todas partes. Interpretando estas leyes, y provistos de un conocimiento cabal de una cuenca y de su ambiente, es posible predecir el comportamiento hidrológico de la misma con cierta exactitud.

Las mediciones de las cuencas y de los factores que con ella se relacionan, son fundamentales para la exacta interpretación del comportamiento de las mismas. Aquellas de gran importancia pueden justificar un estudio detallado y especial, sin embargo, no todas las cuencas del mundo pueden investigarse en sus detalles hidrológicos. La respuesta, en cambio se basa en la investigación general. El resultado de esta investigación podrá luego trasladarse con confianza a otras cuencas dentro de los confines de una razonable homogeneidad (Hauri, 2006).

1. Recopilación de antecedentes

Esta actividad comprendió la búsqueda de diversos antecedentes, científicos, en revistas y actas de congresos - jornadas. Este estudio se centra en la información del área de estudio, y de áreas adyacentes incluyendo temas generales vinculados con la disciplina. A continuación se expone una caracterización particular de la cuenca del Arroyo Itacaruaré

El área de estudio fue la Cuenca del Arroyo Itacaruaré, compuesta principalmente por los arroyos Itacaruaré, del Medio y del 25. Comprende una superficie aproximada de 349 km² y está ubicada en los departamentos de Leandro N. Alem, San Javier y Concepción de la Sierra. Geográficamente el centroide de la cuenca se ubica latitud sur 27° 40' y longitud oeste 55° 18'. La Ruta Nacional N° 14 y la Ruta Provincial N° 4, constituyen la red vial más importante.

En la figura 3a se presenta la ubicación de la cuenca de estudio dentro de los diferentes departamentos. En la figura 3b se visualiza la cuenca sobre una imagen Landsat 224/079 con su sistema de drenaje.

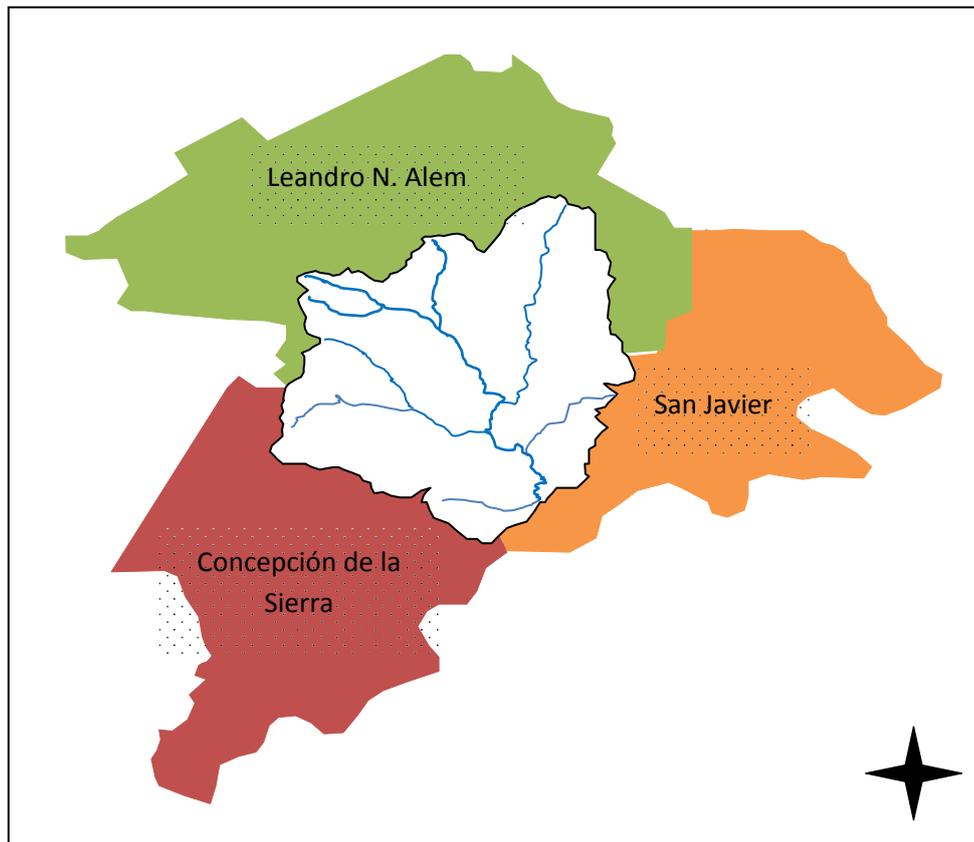


Figura 3a: Mapa de ubicación de la Cuenca del Arroyo Itacaruaré en el ámbito departamental de la Provincia de Misiones.

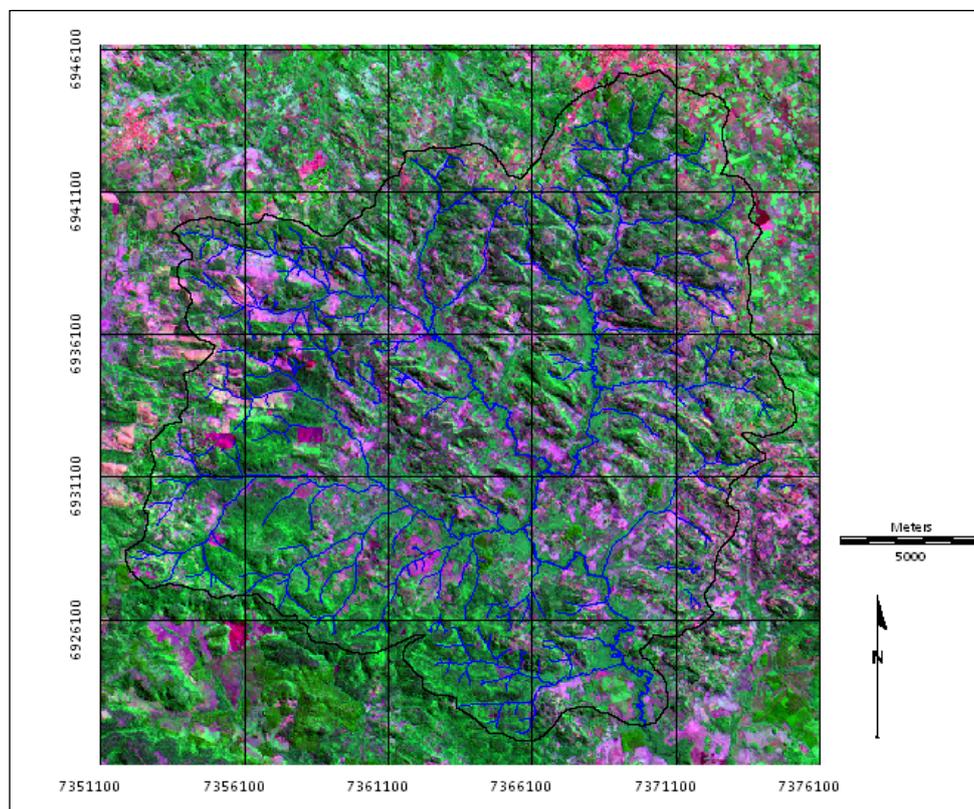


Figura 3b: Mapa de ubicación de la Cuenca del Arroyo Itacaruaré en la imagen satelital Landsat 224/079. Fecha: 02 de abril del 2009.

1.1 Clima

Temperaturas

El análisis de datos de temperaturas que se presenta en este trabajo incluye valores medios, extremos (máximos y mínimos), mensuales y anuales de la temperatura, así como también frecuencias medias de ocurrencia, correspondientes a Estación Agrometeorología de la E. E. A Cerro Azul durante el período 1967- 1996. La medición de la temperatura se realizó con termómetros. Se actualizaron estos datos al año 2007, por medios de las lecturas y análisis de informes elaborados por dicha estación.

En procesamiento de la información se consideraron las **Temperaturas máximas**, para lo cual se evaluaron los valores extremos de la temperatura mensual y anual; **Temperaturas medias**, se analizaron los valores medios de las temperaturas mensuales y anuales; **Temperaturas mínimas**, y se evaluaron los valores extremos de la temperatura mensual y anual.

Precipitaciones

La precipitación es un fenómeno muy variable en el espacio y el tiempo. Es el resultado del enfriamiento de las masas de aire calientes saturadas de agua, las cuales al perder temperatura por el ascenso a niveles superiores, se condensan formando pequeñas gotas, que se precipitan a la tierra en forma de lluvia. La medición de la precipitación en la cuenca, se efectuó por medio de pluviómetros y pluviógrafos.

- El pluviómetro es un aparato muy sencillo y fácil de manejar. Consta de un cilindro con apertura de tamaño estándar, que sirve para coleccionar el agua llovida. La precipitación recogida, se mide con una regla calibrada, en milímetros, o por medio de una probeta graduada.
- El pluviógrafo es un instrumento que registra la precipitación, mediante un grafica montada en un cilindro, el cual es girado por un reloj. Tiene la ventaja de que va registrando las lluvias en la hora que se van presentando. La unidad medida es milímetros.

Se efectuó un estudio de los datos de la Estación Agrometeorológica de la E.E.A. Cerro Azul para la serie de los años 1967-1996. Se realizó una actualización de dicha serie al año 2006. Para el proceso de la información se tuvieron en cuenta los valores de las precipitaciones diarias mensuales y anuales. Con los cuales se procedió a realizar un análisis por separado para las precipitaciones anuales, mensuales y diarias, teniendo en cuenta su valor máximo medio y mínimo para cada uno de los casos.

1.2 Morfología de la cuenca

El funcionamiento de una cuenca se asemeja al de un colector que recibe la precipitación y la convierte en escurrimiento. La forma de la cuenca controla la velocidad con que el agua llega al cauce principal, cuando sigue su curso, desde el origen hasta su desembocadura. Esta transformación depende de las condiciones climáticas y las características físicas de la cuenca. Desde el punto de vista hidrológico, además del volumen de escurrimiento, también interesa su reparto en el tiempo, función de esas condiciones y características (Bustamante, 1984).

Desde el punto de vista de su funcionamiento, la cuenca vertiente puede caracterizarse por su morfología, por la naturaleza del suelo y por la cobertura vegetal.

La influencia de estos factores sobre la transformación de la precipitación en escorrentía es fácilmente intuible cualitativamente, estribando la dificultad en expresar estas influencias mediante parámetros sencillos. Sin embargo, es posible definir cierto número de índices, susceptibles de servir, al menos de referencia, en la clasificación de cuencas y de facilitar los estudios de semejanza.

La morfología de la cuenca, según Bustamante (1984) queda definida por diferentes tipos de parámetros:

- De relieve.
- De forma.
- De relieve con relación a la erosión.
- Relativos a la red hidrográfica.

1.2.1 Parámetros de relieve

La influencia del relieve sobre la Cuenca del Arroyo Itacaruaré es evidente. A mayor pendiente corresponderá una menor duración de concentración de las aguas de escorrentía en la red de drenaje y afluentes al curso principal. Los parámetros más utilizados son los siguientes:

a. Área (A)

Es la superficie encerrada por la divisoria de aguas. El área de la cuenca se considera como el superficie que contribuye con la escorrentía superficial y está delimitada por la divisoria topográfica. Es considerada como el parámetro físico básico que define a una cuenca, siendo determinante de la escala de varios fenómenos hidrológicos tales como, el volumen de agua que ingresa por precipitación, la magnitud de los caudales, etc. Para la administración y manejo de las cuencas, se subdividen en subcuencas que nos determinan áreas homogéneas de paisaje y uso.

b. Perímetro (P)

El perímetro es la longitud del límite exterior de la cuenca y depende de la superficie y la forma de la cuenca. Es la medición en longitud de la línea envolvente del área.

c. Longitud axial (La)

Es la distancia existente entre la desembocadura y el punto más lejano de la cuenca. Es el mismo eje de la cuenca.

d. Ancho promedio (AP)

Es el cociente entre el área de la cuenca y su longitud axial (Fórmula 1.)

$$AP = \frac{A}{La}$$

Fórmula 1. Ancho promedio de la Cuenca.

Donde:

AP : Ancho promedio de la Cuenca (m).

A : Área (m²).

La : Longitud axial (m).

e. Altura media

Se calcula como el coeficiente entre el volumen de la cuenca (superficie comprendida entre la curva hipsométrica y los ejes coordenados) y su superficie. (Fórmula 2).

$$\bar{h} = \frac{V}{A}$$

Fórmula 2: Altura media.

Donde:

\bar{h} : Altura media (m).

V: volumen de la cuenca (m³).

A : Superficie de la Cuenca (m²).

La altura media es mayor cuanto más se eleva el relieve por encima de la altitud mínima y menor cuando las variaciones de altitud presente el relieve son menores.

f. Curva hipsométrica

Es frecuente definir el relieve por la curva hipsométrica de la cuenca, que representa gráficamente cotas del terreno en función de las superficies correspondientes. Para realizarlo se lleva, a escalas convenientes, la altitud dada en las ordenadas y la superficie de la cuenca, para la cual cada punto tiene de cota al menos igual a esa altitud, en proyección horizontal, en las abscisas. Esta última se obtiene planimetrando las superficies correspondientes al área definida en la cuenca entre la curva de nivel cuya cota se ha definido en las ordenadas y los límites de la cuenca por encima de la citada cota; se verifica esta operación para todos los intervalos seleccionados en las ordenadas.

La curva hipsométrica permite caracterizar el relieve. Una pendiente fuerte en el origen hacia cotas inferiores indica llanuras o penillanuras; si la pendiente es muy fuerte hay peligro de inundación. Una pendiente muy débil en esa parte revela un valle encajonado. Una pendiente fuerte hacia la parte media indica una meseta. Los datos de elevación son significativos sobre todo para considerar la acción de la altitud en el comportamiento de la temperatura y la precipitación.

Relación hipsométrica de la curva hipsométrica: se extrae al dividir el área sobre la curva hipsométrica, entre el área bajo la curva hipsométrica.

1.2.2 Parámetro de forma

La forma de la cuenca influye sobre los escurrimientos y sobre la marcha del hidrograma resultante de una precipitación así en una cuenca de forma alargada de agua discurre en general por un solo cauce principal, mientras que en otra de forma ovalada los escurrimientos recorren cauces secundarios hasta llegar a uno principal, por lo que la duración del escurrimiento es superior.

Forma de una cuenca: interviene de manera importante en las características del hidrograma de descarga de un río, particularmente en los eventos de gastos máximos. Se determina con base en:

a. Coeficiente de Gravelius. Índice de compacidad (C_g)

Coeficiente (o índice) de Compacidad (K_c): definido por Gravelius como la relación entre el perímetro de la cuenca y la circunferencia del círculo que tenga la misma superficie que la cuenca. Este coeficiente es igual a 1 cuando la cuenca es perfectamente circular, y de 1,128 para una cuenca cuadrada. Puede alcanzar un valor de 3 en el caso de cuencas muy alargadas.

El coeficiente de compacidad de Gravelius, es el índice que nos permite relacionar el perímetro de la cuenca con el perímetro de un círculo de área equivalente al de la cuenca, y de esta manera representar esta característica.

Relaciona el perímetro de la cuenca con el perímetro de otra teoría circular de la misma superficie. (Fórmula 3).

$$C_g = \frac{P}{2\sqrt{\pi \cdot A}} = 0,28 \frac{P}{\sqrt{A}}$$

Fórmula 3: Coeficiente de Gravelius. Índice de compacidad

Donde:

C_g : Coeficiente de Gravelius

P : Perímetro de cuenca (km).

A : Superficie de la cuenca en (km).

El valor que toma esta expresión es siempre mayor que la unidad y crece con la irregularidad de la forma de la cuenca, estableciéndose la siguiente clasificación: (Tabla 1)

C_g	Forma
1,00 - 1,25	Redonda
1,23 - 1,50	Ovalada
1,50 - 1,75	Oblonga

Tabla 1: Clasificación del coeficiente de Gravelius.

Su valor será mayor que la unidad y crecerá con la irregularidad de la forma de la cuenca.

b. Rectángulo equivalente

Roche propone que el escurrimiento de una cuenca dada es aproximadamente el mismo en condiciones climatológicas idénticas, que sobre un rectángulo de la misma superficie, teniendo el mismo coeficiente de Gravelius y la misma repartición hipsométrica y suponiendo que la distribución del suelo vegetación y densidad de drenaje son representadas en las diferentes aéreas comprendidas entre curvas de nivel (Bustamante, 1984).

Es una transformación puramente geométrica de la cuenca en un rectángulo del mismo perímetro, convirtiéndose las curvas de nivel en rectas paralelas a los lados menores, siendo estos la primera y última curva de nivel. Dicha transformación toma las expresiones de la fórmula 4 y 5.

$$L = \frac{C_g \sqrt{A}}{1,12} \left(1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1,12}{C_g} \right)^2} \right)$$

Fórmula 4: Altura del Rectángulo

$$I = \frac{Cg \sqrt{A}}{1,12} \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1,12}{Cg} \right)^2} \right)$$

Fórmula 5: Base del Rectángulo

Donde, en unidades homogéneas:

L : Altura del rectángulo (m).

I : Base del rectángulo (m).

Cg : Coeficiente de Gravelius

A : Superficie de la cuenca (m²)

c. Factor de forma (IF)

Este factor regula la concentración del escurrimiento superficial. Relaciona el movimiento del agua y la respuesta de la Cuenca a tal movimiento, controlando la velocidad con que el agua llega al el cauce.

El índice expresa la relación entre el ancho promedio a la longitud axial de la cuenca. (Fórmula 6).

$$IF = \frac{AP}{La}$$

Fórmula 6: Factor de Forma

Donde:

IF : Factor de forma

AP : Ancho promedio (m).

La : Longitud axial (m).

Ante una determinada precipitación, la forma de la cuenca influye sobre los escurrimientos

En una cuenca compacta, comparada con otra de igual superficie pero alargada, los tiempos de concentración serán menores. Esto significa una reunión más rápida de las aguas en el curso principal de una situación más desfavorable (Mármol 2006).

Una cuenca alargada, con un colector de mayor longitud que la totalidad de los tributarios, estará sujeta a crecientes de menor magnitud. Una cuenca de forma triangular, con dos vértices en las cabeceras, afluentes de similar longitud y sincronismo en la llegada, provocará crecidas más significativas.

También da alguna predicción de la tendencia de la cuenca hacia las crecidas. Así, las cuencas con factor de forma bajos, son menos propensas a tener lluvias intensas y simultáneas sobre su superficie, que un área de igual tamaño con un factor de forma mayor. Cuando IF es similar a 1, se está ante una cuenca de forma redondeada. Si se establecen valores menores a 1, la cuenca presenta una forma alargada.

1.2.3 Parámetros de relieve en relación con la erosión

Es evidente el carácter determinante que toma el relieve en el fenómeno erosivo.

a. Factor topográfico

El proceso de degradación a que se ve sometida una cuenca al igual que el caudal máximo, está muy influenciados por la configuración topográfica, ya que el poder erosivo se manifiesta en mayor o menor grado de acuerdo a los distintos grados de pendiente.

López Cadenas de Llano (1998), generó una clasificación de pendientes medias que explican las diferentes clases de pendiente en estudio, utilizadas para la confección de la cartografía en esta tesis (Tabla 2).

Pendientes medias (%)	Tipo de relieve	Categoría
<– 3	Plano	1
3 – 7	Suave	2
7 – 12	Mediano	3
12 – 20	Accidentado	4
20 – 35	Fuerte	5
35 – 50	Muy fuerte	6
50 – 75	Escarpado	7
Mayor a 75	Muy escarpado	8

Tabla 2: Rangos y tipos de pendiente, según López Cadenas de Llano (1998).

El cálculo de las pendientes media se efectuó tomando como base dos zonas diferenciadas fisiográficamente. Para determinar la pendiente media de la cuenca se utilizó el mapa topográfico de la cuenca a escala 1:10.000 y el procedimiento ha sido según la fórmula 7:

$$PM(\%) = \frac{(D * L)}{A}$$

Fórmula 7: Factor topográfico

Donde:

PM (%): Factor topográfico (%).

L : Longitud de las curvas de nivel (km).

D : Equidistancia entre curvas medidas (km).

A : Área de la cuenca (km).

1.2.4 Parámetros relativos a la red hidrográfica

Se llama red hidrográfica al drenaje natural, permanente o temporal, por el que fluyen las aguas de los escurrimientos superficiales. La red hidrográfica superficial se analizó a través de una serie de clasificaciones y parámetros.

a. Densidad de drenaje (D)

La densidad de drenaje está definida para cada cuenca como la relación entre la suma de las longitudes de todos los cursos de agua que drenan por a la cuenca con respecto al área de la misma (López Cadenas de Llano y Mintegui Aguirre, 1987; López Cadenas de Llano, 1998). Esta fue establecida por Horton según la fórmula 8, y se expresa en (km^{-1}).

$$D = \frac{\sum L_i}{A}$$

Fórmula 8: Densidad de drenaje

Donde:

D : Densidad del drenaje (km^{-1}).

$\sum L_i$: Sumatoria de la longitud de todos los cursos de agua que drenan en la cuenca (km).

A : Superficie de la cuenca (km^2).

En un principio, y sin tener en cuenta otros factores del medio físico de la cuenca, cuanto mayor sea la densidad del drenaje, más rápida será la respuesta de la cuenca frente a una tormenta, evacuando el agua en menos tiempo.

En efecto, al ser la densidad de drenaje alta, una gota deberá recorrer una longitud de ladera pequeña, realizando la mayor parte del recorrido a lo largo de los cauces, donde la velocidad del escurrimiento es mayor; por lo tanto los hidrogramas en principio tendrán un tiempo de concentración corto.

Se considera que la densidad de drenaje caracteriza cuantitativamente la red hidrográfica de la cuenca, además aclara el grado de relación entre el tipo de red y la clase de material

predominante, los cuales permiten al escurrimiento y nos pone de manifiesto que tipo de manejo se debe aplicar sobre esta cuenca, para evitar el deterioro de los cauces (Henaos, 1988; López Cadenas de Llano, 1998).

b. Pendiente media del cauce (J)

La pendiente media del cauce se deduce a partir del desnivel topográfico sobre el cauce principal y la longitud del mismo (López Cadenas de Llano y Mintegui Aguirre, 1987; López Cadenas de Llano, 1998). Se expresa en porcentaje con la fórmula 9.

$$J = \frac{(H \text{ max} - H \text{ min})}{L} \times 100$$

Fórmula 9: Pendiente media del cauce

Donde:

J : Pendiente media del cauce (%).

H max : Cota máxima sobre el curso de agua (m).

H min : Cota mínima sobre el curso de agua (m).

L : Longitud del río más largo (m).

c. Alejamiento medio (a)

Es un coeficiente que relaciona el curso de agua más largo con la superficie de la cuenca. Su expresión es la fórmula 10:

$$a = \frac{L}{\sqrt{A}}$$

Fórmula 10: Alejamiento medio

Donde:

a : Alejamiento medio (m*km⁻²).

L : Longitud del río más largo (m).

A : Superficie de la cuenca (km²).

2. Generación del Modelo Cartográfico

Las características fisiográficas de la Cuenca del Arroyo Itacaruaré se representan por dos sectores bien definidos que evidencian diferenciales de acuerdo al grado de pendiente y capacidad erosiva. Los mismos han sido analizados y se presentan y los resultados de esta tesis.

Para la cuenca del Arroyo Itacaruaré, se generó un modelo cartográfico temporal entre los años: 1999, 2004, 2008 y 2009. Su elaboración se basó en la utilización de material bibliográfico, cartografía del Instituto Geográfico Militar (I.G.M.), imágenes satelitales Landsat 224/079, y datos de reconocimiento del terreno, recolectados a campo.

El modelo cartográfico generado expresa la secuencia de procesamiento cartográfico desarrollado en esta tesis (Tabla 3). A partir de la interpretación de imágenes satelitales, observaciones a campo y la cartografía existente, se obtuvo información básica del área de estudio, reflejada en la cartografía básica.

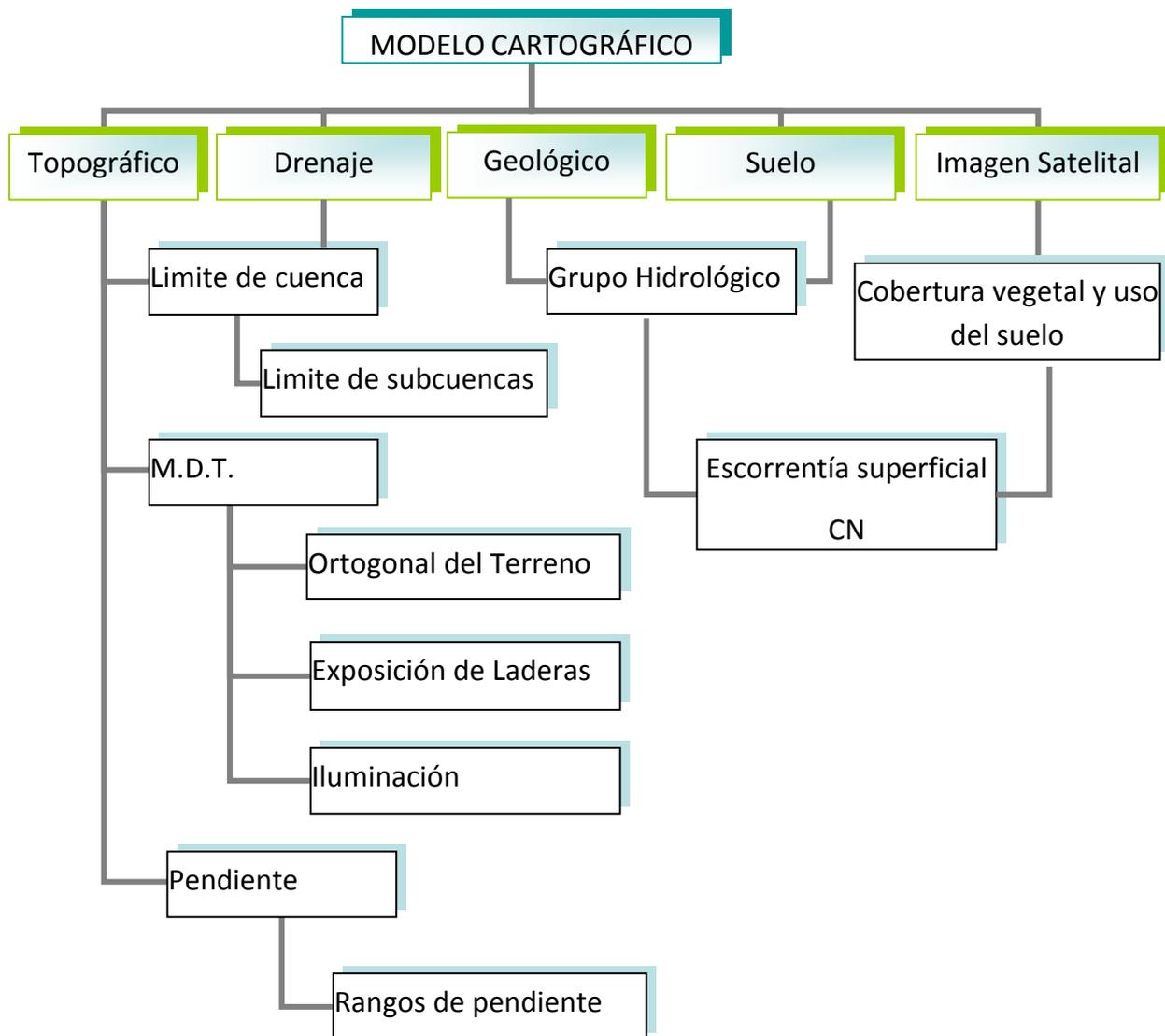


Tabla 3: Síntesis de modelo cartográfico utilizado en la Cuenca del Arroyo Itacaruaré.

*Siendo M.D.T. Modelo Digital del Terreno, y CN el Número de Curva.

Para la elaboración de los mapas se utilizó el programa Idrisi Andes. Sistema de Información Geográfica (S.I.G), del Clark Labs for Cartographic Technology and Analysis. Clark University (2004). El procesamiento digital se inició con la rasterización de los mapas vectoriales, que consistió en su transformación al formato raster, es decir, en un sistema de cuadrícula de píxeles.

2.1. Mapa topográfico.

A partir de las cartas topográficas originales generadas por la Compañía Argentina de Relevamientos Topográficos y Aerofotogramétricos (C.A.R.T.A., 1964) a escala 1: 10.000; con una equidistancia altitudinal de 25 metros, se ha realizado la digitalización de las cartas que integran la cuenca del Arroyo Itacaruaré, denominadas en la tabla 4.

	Nombre	Número de carta
1	Cerro Azul	2754-25-3C3
2	Cerro Azul	2754-25-3C4
3	Leandro N. Alem	2754-25-3D3
4	Leandro N. Alem	2754-25-3D4
5	Colonia Taranco	2754-31-1A1
6	Arroyo del Medio	2754-31-1A2
7	Colonia Taranco	2754-31-1A3
8	Arroyo del Medio	2754-31-1A4
9	Colonia Caa Guazú	2754-31-1B1
10	Colonia Caa Guazú	2754-31-1B2
11	Colonia Caa Guazú	2754-31-1B3
12	Dos Arroyos	2754-31-1B4
13	Colonia San Juan de la Sierra	2754-31-1C1
14	Colonia Caa Guazú	2754-31-1C2
15	Colonia San Juan de la Sierra	2754-31-1C3
16	Colonia San Juan de la Sierra	2754-31-1C4
17	Colonia Caa Guazú	2754-31-1D1
18	Colonia Caa Guazú	2754-31-1D2
19	Colonia Santa María de la Mayor	2754-31-1D3
20	Colonia Itacaruaré	2754-31-1D4

Tabla 4: Denominación de las cartas topográficas.

La digitalización se basó en datos analógicos que por medios de ingreso de curvas de nivel, con cotas sobre el nivel del mar, permitió generar el mapa topográfico vectorial. Estas curvas mantuvieron la equidistancia original de la cartografía base.

2.2. Mapa red de drenaje:

La digitalización del drenaje ha sido realizada tomando como base mapas topográficos y de drenajes realizados por el C.A.R.T.A. (1964) a escala 1:10.000, generando un mapa de drenaje vectorial que presenta cursos de agua permanentes y temporales. Este mapa se superpuso con la Imagen satelital Landsat 224/079, para corroborar la distribución del drenaje en el espacio.

2.3. Delimitación de la cuenca y subcuencas:

Se ha definido el límite de la cuenca a partir de divisorias de aguas, establecidas por medio del mapa de curvas de nivel y el sistema de drenaje anteriormente mencionado. Posteriormente se realizó la digitalización y rasterización para su procesamiento. A partir del procesamiento con el programa Idrisi Andes del mapa topográfico rasterizado, se corroboró la delimitación de la cuenca y subcuencas.

2.4. Modelo digital del terreno:

Se realizó la interpolación de las cotas altimétricas con el programa Idrisi Andes por procesamiento del mapa topográfico, con una equidistancia de 25 metros definiendo de esta forma el modelo digital del terreno (M.D.T.).

2.5. Mapa de rangos de pendiente:

A partir del M.D.T. se realizó un mapa de pendiente según su gradiente porcentual, mencionado en 1.2.3.c. Se zonificó el área según intervalos de clases de pendiente empleando el programa Idrisi Andes a partir de las cartas topográficas digitalizadas. Este mapa brinda información para establecer pautas de manejo de los suelos con el fin de minimizar los procesos erosivos.

2.6. Mapa de exposición de laderas:

El mapa de exposición de laderas se generó a partir del M.D.T. (modelo digital del terreno), con la aplicación del programa Idrisi Andes. Este representa la orientación del terreno con respecto al norte geográfico.

2.7. Mapa de iluminación de laderas:

Recurriendo al programa Idrisi Andes se generó la cartografía que describe la iluminación de las laderas con respecto a la dirección del flujo solar, considerando la declinación magnética de 0° 38' W; año 1996.

2.8. Imagen satelital:

Como fruto de una técnica de análisis de análisis satelitales se obtiene una cartografía e inventario de la categoría objeto de estudio. Una imagen multibanda, como es el caso de una imagen Landsat TM, se convierte un mapa del tamaño y características del original, definida por pixeles con una relación directa a la radiancia detectada por el sensor. A cada valor de pixel se le otorga una categoría para generar una clasificación digital. Buscando una caracterización relativa de un territorio concreto (Chuvieco, 1996).

La implementación de un método no supervisado de clasificación se dirigió hacia la definición de clases espectrales presenten en una imagen, donde la intervención humana se centro en la interpretación de dichas clases adaptadas al tipo uso y cobertura de suelo en la Cuenca del Arroyo Itacaruaré (Chuvieco, 1996).

Para la definición de zonas de uso y cobertura del suelo homogéneo, se utilizaron para la delimitación de cada grupo espectral por medio de una clasificación no supervisada. Para ello se implementaron una serie etapas:

La realización de este trabajo se realizo por medio de las imágenes satelitales generadas por el sensor TM (Thematic Mapper) del satélite Landsat 5. Las imágenes presentan las siguientes características:

- La resolución temporal, que se refiere al tiempo de revista del satélite, siendo esta de 16 días.
- La resolución radiométrica, es decir, la sensibilidad del sensor para diferenciar niveles de intensidad de la señal de retorno, es de 8 bits.
- La resolución espectral es ancho de las bandas en el espectro electromagnético al que es sensible el sensor, caracterizada por un número.
 - banda 1: 0,45-0,52 mm: azul
 - banda 2: 0,52-0,60 mm: verde
 - banda 3: 0,63-0,69 mm: rojo
 - banda 4: 0,76-0,90 mm: infrarrojo próximo
 - banda 5: 1,55-1,75 mm: infrarrojo medio
 - banda 6: 10,40-12,50 mm: infrarrojo térmico
 - banda 7: 2,08-2,35 mm: infrarrojo medio

- La resolución espacial determina el tamaño del menor objeto que es posible distinguir con el sensor. En los canales 1, 2, 3, 4, 5 y 7 la misma es de 30 m. La banda 6 tiene una resolución espacial de 120 m. El área de cobertura de cada imagen es de 185 x 170 km.

Se aplicó el procesamiento digital de base de datos con el programa ERDAS 8.5. (Leyca). Se llevó a cabo la unión de las bandas, la recodificación para el reagrupamiento, la ejecución de filtros. Con la finalidad de ajustar la georreferenciación de la cartografía a un nivel métrico decimal (metros), se unificó las coberturas a coordenadas planas en la Proyección Gauss Krüger con Esferoide Internacional 1909 y Datum WGS 84, en faja 7, meridiano central de la misma es 54° oeste. No se consideró para este estudio las imágenes que contenían más un 30% de cobertura de nubes.

A continuación se presentan las etapas realizadas para confeccionar el mapa de uso y cobertura del suelo la Cuenca del Arroyo Itacaruaré.

- La selección de las imágenes se realizó teniendo en cuenta dos criterios:
 - 1) Para el estudio interanual se seleccionaron imágenes satelitales correspondientes al período estival desde 1999 hasta 2009, para realizar la evolución de la superficie de ocupación de los distintos usos y coberturas del suelo en la Cuenca de a Arroyo Itacaruaré
 - 2) Para el estudio intraanual se seleccionaron imágenes satelitales correspondientes al año 2004 (considerado época de sequía) y al año 1999 (época húmeda).
- Una vez elegidas las imágenes satelitales, se sometieron a una serie de procesos que incluyen la importación a un formato compatible con el programa ERDAS Imagine 8.5 (Leyca) y las correcciones atmosféricas, geométricas y radiométricas.
- Con el programa ERDAS Imagine 8.5, se ejecutó la clasificación no supervisada (12 clases). Posteriormente mediante interpretación visual de las imágenes, se reagrupó obteniendo 3 clases según densidad de cobertura: 1- Bosque alto; 2- Matorral - Cultivos industriales; 3- Pastizal - Áreas Agrícolas.
- Se realizó un filtro estadístico de mediana de 3x3.
- Se exportaron las imágenes resultantes de la clasificación no supervisada a un formato compatible con el programa Idrisi Andes.

2.9. Mapa geológico:

Se realizó la digitalización de la cartografía temática geológica, a una escala 1:50.000. Esta cartografía se basó en dos mapas denominados Colonia Caa Guazú (Nº 2757-31-1) y Leandro N. Alem (Nº 2754-25-3) (C.A.R.T.A., 1964).

Posteriormente se rasterizó con el programa Idrisi Andes, generando un mapa geológico georreferenciado de la zona en estudio.

2.10. Mapa de suelos:

Se realizó la digitalización de las unidades cartográficas de suelo, a una escala 1:50.000, correspondientes a Colonia Caa Guazú (Nº 2757-31-1) y Leandro N. Alem (Nº 2754-25-3) (C.A.R.T.A., 1964). Posteriormente se rasterizó con el programa Idrisi Andes, generando un mapa que refleja los distintos tipos de suelos característicos de la cuenca.

2.11. Mapas de cobertura vegetal y uso de suelo:

Se confeccionó un mapa de la cobertura vegetal, tanto natural como implantada que posee la cuenca. Esta cartografía ha sido elaborada para el período que abarca desde marzo de 1999 hasta febrero de 2009.

Se realizó la interpretación de las imágenes satelitales Landsat 224/079. Esta tarea permitió identificar las unidades fisonómicas florísticas así como también la tendencia de uso del suelo. La primera instancia de clasificación no supervisada, agrupó en las siguientes clases: Bosques Altos (bosque nativo y bosque implantado), Matorral – Cultivos Industriales (cultivos perennes como yerba y te), Pastizal - Áreas Agrícolas (cultivos anuales y pasturas).

A partir de un procesamiento posterior se obtuvo una clasificación supervisada de la cobertura vegetal y uso del suelo con corroboración a campo.

Este relevamiento de campo permitió definir la cobertura actual del suelo y, por medio de entrevistas personales con los actuales habitantes de la cuenca, reconstruir la historia del uso de las tierras del área en estudio. Las imágenes satelitales y los muestreos de campo, se georreferenciaron mediante Global Positioning System (GPS).

La manipulación espacial de los datos se efectuó con S.I.G., para establecer los cambios temporales a partir de la comparación de los mapas de cobertura vegetal de los años 1999 y 2009.

El procesamiento cartográfico de las tendencias de cambio de uso de suelo se realizó con el programa Idrisi Andes, con el módulo denominado Land Change Model for Ecological Sustainability.

- 1) **Estudio interanual:** las fechas consideradas para la identificación de cambio de cobertura en el último decenio, son:
 - 06 de marzo de 1999
 - 16 de febrero de 2004
 - 13 de febrero de 2009
- 2) **Estudio intraanual:** las fechas consideradas para la identificación del cambio de cobertura durante el año se realizó para los años 1999 (época húmeda) y 2004

(considerado época sequia). Particularmente las tomas de la imágenes satelitales fueron

Época Húmeda:

- 6 de marzo de 1999
- 30 de septiembre de 1999

Época de Sequía:

- 16 de febrero de 2004
- 7 de junio de 2004

El procesamiento geoespacial con el modulo denominado modelización del cambio de uso de la tierra para sustentabilidad ecológica permitió zonificar las tendencia de cambio temporales y espaciales para la Cuenca del Arroyo Itacaruaré.

2.12. Mapa de grupos hidrológicos:

Según la clasificación establecida por Soil Conservation Service de los suelos a los que asigna según el comportamiento del suelo ante una precipitación, es decir la capacidad de infiltración. De esta manera, se clasifica a las diferentes categorías en cuatro grupos, dependiendo de su comportamiento hidrológico, denominados grupos hidrológicos, siendo los mismos los presentados en la tabla 5.

Comportamiento del suelo	Grupo hidrológico (GH)			
	A	B	C	D
Escorrentía	Baja	Moderadamente baja	Moderadamente alta	Alta
Permeabilidad	Alta	Moderada	Poca	Muy poca
Clases texturales	Arenosa Arenosa-Franca Franco-Arenosa	Franco- Limosa Franca Limosa	Franco-Arcillo- Arenosa Franco-arcillo- Arenosa Franco-Arcillosa	Arcillo-Arenosa Arcillo-Limosa Arcillosa
Observaciones	Suelos profundos, sueltos	Mediana a buena profundidad	Presencia de estratos impermeables	Presencia de una capa muy impermeables

Tabla 5: Descripción de Grupos Hidrológicos según USDA (1978).

Para la definición de los grupos hidrológicos (GH) de suelos se utilizan las clases texturales (USDA) y el diagrama triangular con las curvas de conductividad hidráulica a saturación según tablas y gráficos (López Cadenas de Llano, 1998).

El mapa de GH se obtuvo por superposición de los mapas temáticos geológico y de suelo. La cuenca del arroyo Itacaruaré se dividió en grupos hidrológicos según su comportamiento al escurrimiento superficial. Además se estableció el GH por subcuenca.

2.13. Mapa de CN:

El método aplicado para la zonificación de la escorrentía superficial se basó en que las combinaciones de suelo vegetación de características semejantes bajo un mismo grupo hidrológico, responderán de manera análoga bajo el efecto de una tormenta. A cada tipo de complejo suelo – vegetación, según grupo hidrológico (GH), se le asignó un valor, llamado Número de Curva o Número Hidrológico (CN), que define las condiciones hidrológicas, es decir, su comportamiento frente a la escorrentía superficial.

El método de Número de Curva, fue elaborado por U. S. Soil Conservation Service (1972). Se basa en la estimación directa de la escorrentía superficial de una lluvia aislada, a partir de las características del suelo, uso del mismo y de su cobertura vegetal.

Conocido el grupo hidrológico al que corresponden los diferentes suelos de la cuenca y teniendo en cuenta su uso y/o la vegetación que sustentan, incluyendo el tratamiento cultural que reciben, se zonificó en los diferentes Números de Curva en las diferentes áreas de la cuenca, para lo cual se utilizan las tablas correspondientes (Mintegui Aguirre y López Unzú, 1990; López Cadenas de Llano, 1998).

El CN se obtuvo por superposición de los mapas de cobertura vegetal y uso de suelo y de grupos hidrológicos. Este mapa describe el comportamiento ante la precipitación (capacidad de escorrentía superficial) de acuerdo al tipo de suelo hidrológico y una cubierta vegetal asociada con un tratamiento de cultura. A partir de este procesamiento se obtuvo un mapa de CN ponderado para cada subcuenca y para la cuenca completa, utilizando el SIG Idrisi Andes.

3. Índice de erosión pluvial (R).

La lluvia como parte del clima es el agente activo de la erosión, que de manera paulatina o brusca y dependiendo de su agresividad, de la cobertura vegetal superficial, de la longitud y pendiente del terreno, ésta remueve la capa superficial del suelo empobreciéndolo, hasta degradándolo. Esta agresividad de las lluvias, es también llamada capacidad para producir erosión o potencial erosivo (Colotti, 2004).

La erosión por gotas de lluvia se incrementa con la intensidad de la lluvia. Una suave y prolongada lluvia puede tener la misma energía total que una lluvia de corta duración y más intensa. Cuando la energía se combina con la intensidad de la lluvia, el resultado es un buen predictor del potencial erosivo, el denominado factor EI_{30} , que expresa la relación energía/intensidad. El factor EI_{30} es el múltiplo entre el valor de la cantidad de agua generada por una tormenta por el máximo de intensidad de la tormenta en 30 minutos. Este término indica como el desprendimiento de las partículas es combinado con la capacidad de transporte.

La erosionabilidad de la lluvia (R) es la capacidad de la misma para producir erosión y depende de las características físicas (Hudson, 1971). Este índice numérico permite obtener una cuantificación de la erosionabilidad relacionada con la erosión del suelo. Existen diferentes métodos para cuantificar este factor, destacándose: Fournier, Hudson, Lal, Onchev y Wischmeier y Smith, este último, el más difundido y aplicado mundialmente.

El R fue desarrollado en los Estados Unidos, y desde su inicio ha sido aplicado ampliamente a nivel mundial dado la relación significativa que demostraron sus autores con las pérdidas de suelo. Asimismo, pasó a formar parte de la USLE (Universal Soil Loss Equation), ecuación que luego de cuatro décadas se sigue empleando para predecir la erosión causada por la lluvia. El índice R, de Wischmeier y Smith (1978), requiere de la lectura de bandas pluviográficas para extraer la información básica.

En estudio realizados por Icona (1988) se menciona que la escasa e irregular densidad de la red de pluviógrafos existentes, hizo necesario investigar una relación entre el factor R calculado con los datos suministrados por esta red y los parámetros de lluvias obtenibles en base a datos proporcionados por la red pluviométrica, más densa y con mejor distribución espacial. Esta situación también se genera en la zona en estudio por esta tesis.

Para analizar la evolución temporal de la erosionabilidad de las precipitaciones en la Cuenca del Arroyo Itacaruaré, se calculó el índice de erosión pluvial (R) en un período que abarca entre 1987-2006. El mismo se definió como el producto de la energía cinética de un aguacero por su máxima intensidad en 30 minutos (I_{30}), que representa la potencia del aguacero para erosionar superficialmente el suelo, expresada en $J.cm.m^{-2}.hs^{-1}$.

La R proviene de multiplicar la energía de la lluvia (E), que representa la influencia de toda la energía de una tormenta erosiva de acuerdo con el tamaño predominante de las gotas y su velocidad de caída, por la intensidad máxima en 30 minutos (I_{30}). Representa la más alta sostenida intensidad, por lo que requirió información pluviométrica específica, que se obtuvo con el análisis directo de las bandas pluviográficas. Esta tarea ha conferido una limitación significativa, debido a que la recopilación y almacenamiento de tal información no es el más adecuado. Este producto se ha denominado índice de erosión pluvial por lluvia (Rainfall Erosion Index) y simbolizado como R.

Rojas y Conde han determinado un índice de lluvia erosiva para un evento cuya cantidad fuese mayor a 12,7mm, y separado del próximo evento por un lapso mayor o igual a 6 horas (1985). Posteriormente, en 1978 incluyeron a los eventos con 6 mm de lluvia o más, siempre que ocurriera en un lapso no menor de 15 minutos, con una intensidad de $24 mm*hs^{-1}$.

La cuantificación del valor de R en esta tesis se expresa en la tabla 6, en el cual se presenta la secuencia de tareas e índices estimados para la determinación del R.

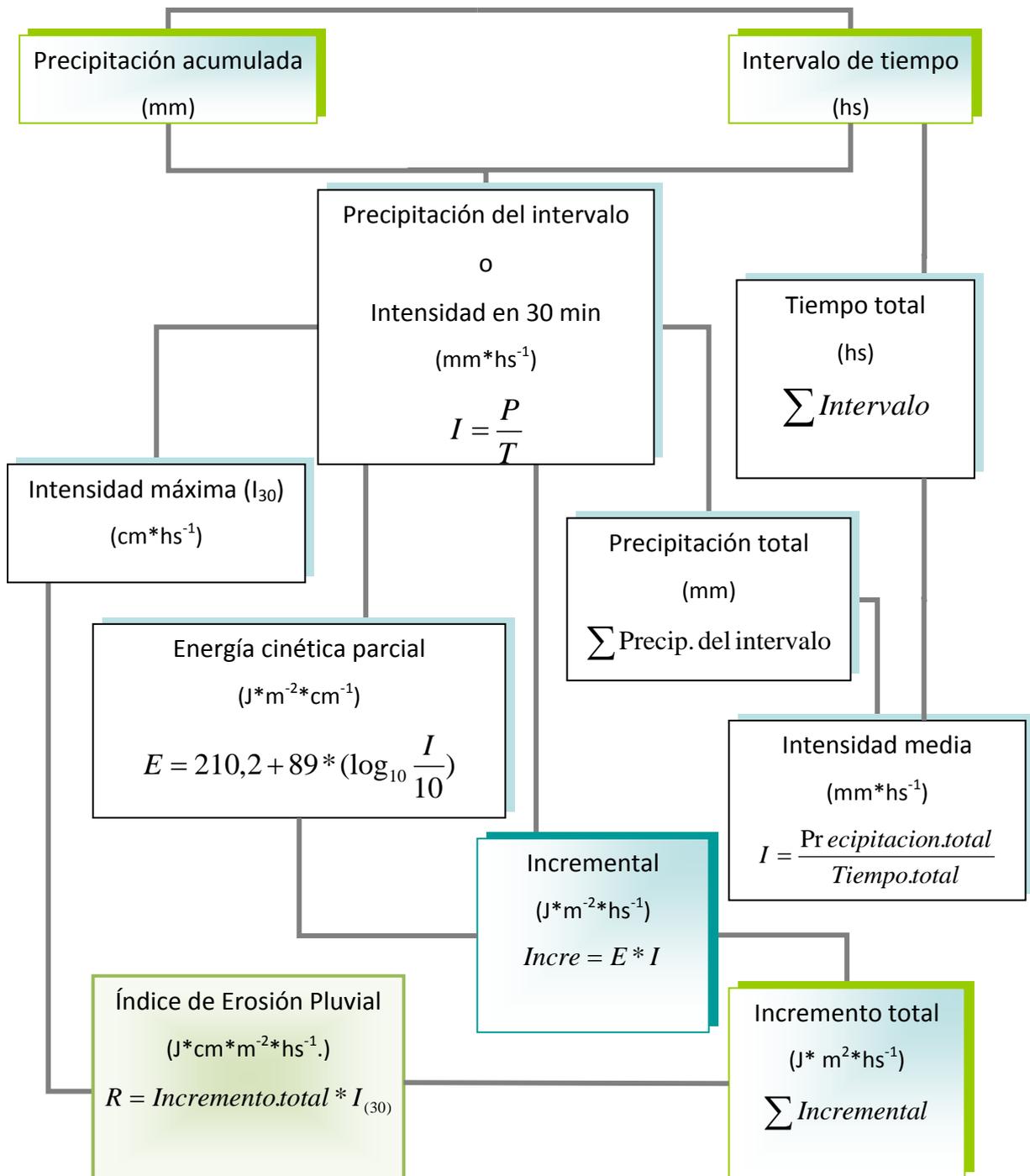


Tabla 6: Secuencia de cálculo de R. Fuente: Romero 2008.

El desarrollo de la secuencia de cálculo del factor R se expresa a partir de los pasos metodológicos, que se resumen a continuación:

- Se realizó la lectura individual de las fajas pluviográficas de un pluviógrafo instalado en la Estación Agrometeorológica del I.N.T.A. E.E.A. Cerro Azul, ubicada en el Municipio Cerro Azul del Departamento L. N. Alem, sobre el límite norte la Cuenca del Arroyo Itacaruaré.
- Se identificaron e interpretaron todas las bandas pluviográficas de las tormentas de índole torrencial (mayores a 13,5 mm) para el período en estudio.
- Se dividió el evento en intervalos de igual duración (30 minutos).
- Se determinó la cantidad de lluvia para cada intervalo anteriormente definido.
- Se calculó la precipitación del intervalo o intensidad (I) cada 30 minutos (Fórmula 11.)

$$I = \frac{P}{T}$$

Fórmula 11: Intensidad a los 30 minutos (I)

Donde:

I : Intensidad a los 30 minutos (mm*hs⁻¹).

P: Cantidad de lluvia de un intervalo (mm).

T: Tiempo de la lluvia en un intervalo (hs).

- Se calculó la energía cinética parcial para cada intervalo. La energía cinética, expresa en (julios* m².cm⁻¹). (Fórmula 12).

$$E = 210,2 + 89 * (\log_{10} \frac{I}{10})$$

Fórmula 12: Energía cinética parcial

Siendo:

E : Energía del aguacero del intervalo (J*m⁻²*cm⁻¹).

I : Intensidad de la lluvia en 30 min (mm*hs⁻¹).

- Se multiplicó la energía cinética parcial por el I dando el Incremental expresado en J*m⁻²*cm⁻¹ (Fórmula 13).

$$Incre = E * I$$

Fórmula 13: Incremental

- Se realizó la sumatoria del incremental constituyó el valor de la energía cinética total para ese evento de lluvia (Incremental) expresada en J*m²*cm⁻¹ (Fórmula 14).

$$IT = \sum \text{Incremental}$$

Formula 14: Incremento total

- Se midió cada segmento con mayor cantidad de lluvia en 30 minutos continuos, valor que representara la intensidad máxima en 30 minutos (I30) expresada en cm.h-1
- Se calculó R, por medio de el múltiplo de el incremento total de la tormenta por la intensidad máxima en 30 minutos, valor que representa el índice de erosionabilidad o índice de erosión por lluvia en (J*cm*m⁻²*hs⁻¹)(Fórmula 15).

$$R = \text{Incremento.total} * I_{(30)}$$

Fórmula 15: Índice de Erosión Pluvial

- Se realizó el procesamiento de cada factor para la determinación de la erosionabilidad de los aguaceros particulares.

La aplicación de esta metodología permitió obtener el índice de erosionabilidad de un evento erosivo y cuyo valor anual (R) es la suma de los valores de erosionabilidad de todas las tormentas en el lapso de un año. Posteriormente se realizó un análisis particular, según la siguiente metodología.

- Se realizó una comprobación tabular por intervalos acumulados de los valores durante períodos específicos, para indicar la contribución mensual y estacional a la erosionabilidad anual.
- Se estableció un análisis de correlación que indique la intensidad en que están relacionados el I30 y precipitación total por tormenta.
- Se generó un análisis comparativo del índice de erosión pluvial con las precipitaciones anuales y mensuales.
- Se elaboró un análisis comparativo del índice de erosión pluvial con tormentas individuales.
- Se efectuó un análisis particular para obtener la ecuación de regresión del tipo modal para el R en la Cuenca del Arroyo Itacaruaré.

La herramienta estadística utilizada para el estudio fue el programa Statgraphics Plus. También se aplicó el coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (N) (Nash, Sutcliffe, 1970; Grunwald, Frede, 1999). N es un medio para medir el ajuste entre el valor estimado y el valor medido.

El cálculo de N esencialmente es la suma de las desviaciones de las observaciones para una regresión lineal cuya pendiente es igual a 1. Si el valor medido es el mismo que el estimado, N es igual a 1. Si el N está entre 0-1, esto nos indica desviaciones entre el valor medido y el estimado. Si es negativo, las estimaciones son muy pobres, y el valor medio de la salida es el mejor estimador que el estimado por el modelo (Nash, Sutcliffe, 1970; Grunwald, Frede, 1999).

El coeficiente de Nash-Sutcliffe (N) para los valores estimados y los medidos pueden ser calculados según se muestra a continuación fórmula 16:

$$N = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_m - Q_{mea_avg})^2 - \sum_{i=1}^n (Q_m - Q_p)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_m - Q_{mea_avg})^2} \quad i = 1, 2, \dots, n$$

Fórmula 16: Coeficiente de eficiencia (Coeficiente de Nash-Sutcliffe)

Donde:

N = Coeficiente de eficiencia (Coeficiente de Nash-Sutcliffe)

Q_m = Valor medido

Q_p = Valor estimado

Q_{mea_avg} = Valor de la media aritmética.

4. Determinación del Índice de erodabilidad del suelo (K).

La erodabilidad de un suelo se valora a partir del índice de erodabilidad (K) propuesto por Wischmeier y Smith (1978). El cálculo de K es independiente de la pendiente y depende básicamente de la permeabilidad, porcentaje de materia orgánica, estructura y en el caso de las rocas, de la consolidación (Tchilinguirian *et al*, 2003.)

Es una compleja propiedad que se la entiende como la facilidad con la cual el suelo es desprendido por el salpicamiento, durante una lluvia o por flujo superficial. Esta propiedad del suelo está relacionada al efecto integrado de la lluvia, escurrimiento e infiltración. Los suelos generalmente llegan a ser menos erosivos con una reducción en la fracción de limo a pesar del correspondiente incremento de la fracción de arcilla o arena. El factor K representa el efecto de las propiedades del suelo y de las características del perfil del suelo en la pérdida de suelo. Los valores de K son asignados usando el nomograma de erodabilidad del suelo, que combina el efecto del tamaño de las partículas, porcentaje de materia orgánica, tipo de la estructura del suelo y la clase de permeabilidad del perfil (Antezana, 2001).

El factor K del suelo se evaluó a partir de la cartografía temática generada en la etapa 2. El factor K se estableció por medio de la relación entre el peso del suelo perdido ($\text{tn}\cdot\text{ha}^{-1}$) y el número de unidades del índice de erosión pluvial correspondientes en condiciones de barbecho continuo. Con el conjunto de los valores obtenidos se calculó el valor de K ponderado para cada suelo, a partir del cual se aplicó la ecuación de regresión en función de las variables representativas de sus propiedades físicas, expresada por la ecuación de Wischmeier y Smith (1978) (Fórmula 17).

$$100 K = 10^4 * 2,71 * M^{1,14} * (12 - a) + 4,20 * (b - 2) + 3,23 * (c - 3)$$

Fórmula 17: Índice de erodabilidad del suelo

Siendo:

K: Índice de Erodabilidad del suelo ($\text{t}\cdot\text{m}^2\cdot\text{hs}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{J}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}$)

M = $(100 - \% \text{ arcilla}) * (\% (\text{limo} + \text{arena muy fina}))$.

M es el factor representativo de la textura. Se establece por el producto del porcentaje de partículas de suelo comprendidas entre 0,002 - 0,1 mm de diámetro expresado en porcentaje, por el porcentaje de partículas de suelo comprendidas entre 0,002 - 2 mm de diámetro, expresado también en porcentaje, a 100 menos el porcentaje de arcilla de la muestra.

a: Porcentaje de materia orgánica

b: Número correspondiente a la estructura del suelo según la siguiente codificación:

- 1- granulo muy fino y grumo muy fino (< 1 mm)
- 2- granulo fino y grumo fino (1-2 mm)
- 3- granulo y grumo medio (2-5 mm) y granulo grueso (5-10 mm)
- 4- granulo liso, prismático, columnar y muy grueso (>10 mm)

c: Clase de permeabilidad del perfil, según la siguiente codificación del USDA-Soil Survey Manual:

- 1- rápida a muy rápida
- 2- medianamente rápida
- 3- moderada
- 4- moderadamente lenta
- 5- lenta
- 6- muy lenta

El factor K se define como la resistencia del suelo al proceso de erosión y transporte, este factor depende de:

- La textura del suelo, asociados a la gravedad y mayor o menor fuerza de arrastre necesaria.
- La arcilla, como base química de unión para formar terrones, entonces suelos con alto contenido de minerales y arcillas tendría mayor resistencia.
- Las dos primeras propiedades estarán fundamentando la fuerza cortante del suelo en función de su cohesión y resistencia (Cayo, *et al.*, 2001).

La zonificación del factor K en la cuenca del Arroyo Itacaruaré se generó a partir de la cartografía temática de la segunda etapa de este trabajo de tesis y de las clasificación de los suelos realizada por C.A.R.T.A. Los valores de textura, materia orgánica y estructura se refieren a los 15-20 cm superiores del suelo y los de permeabilidad a todo su perfil.

Para la determinación de la textura, se realizó el análisis de los perfiles de suelos de las unidades cartográficas, a fin de determinar el porcentaje de arcilla, limo, arena y arena fina en las diferentes clases texturales presentes en los suelos de la cuenca del arroyo Itacaruaré. Además, se determinó el contenido de materia orgánica para unidad cartográfica de suelo.

La información se obtuvo del levantamiento, fotointerpretación y evaluación de los recursos naturales realizados por la provincia de Misiones en cumplimiento de la ley, N° 34, ejecutado por C.A.R.T.A. en los años 1962-1963.

5. Caracterización de la relación entre estructura y materia orgánica para los distintos suelos presentes en la cuenca.

La degradación de suelos y el descenso de la productividad real y potencial son algunos de los aspectos más importantes en la sostenibilidad agrícola. El manejo de las entradas orgánicas y de la materia orgánica del suelo (MOS), representa un componente crítico de la productividad de los agrosistemas de las regiones tropicales. La MOS es fundamental para muchas propiedades bioquímicas, biológicas y físicas, las cuales controlan la actividad de microorganismos y fauna del suelo (Flaig, 1971), promueven la agregación y la reducción de la erosión (Lal, 1986; Woomer *et al.*, 1994), mejoran la entrada y retención de agua y el almacenaje y liberación de nutrientes (Ding *et al.*, 2002) e inmovilizan contaminantes (Rodríguez *et al.*, 2004).

Los usos de la tierra y las prácticas agrícolas ocasionan diferencias en la estructura y composición de la materia orgánica del suelo (MOS) (Rodríguez *et al.*, 2004).

La materia orgánica disminuye la densidad aparente del suelo (por tener una menor densidad que la materia mineral), contribuye a la estabilidad de los agregados, mejora la tasa de infiltración y la capacidad de retención de agua.

La estructura del suelo se define como la disposición espacial de las partículas libres del suelo. Características del suelo tales como la circulación del agua, la aireación, la densidad aparente y la porosidad están influenciadas de manera considerable por la disposición o agregación general de las fracciones iniciales del suelo (Pritchett, 1991).

Las descripciones de la estructura del suelo por lo general se expresan según Pritchett (1991), en el tipo o forma, la clase o el tamaño, y el grado o la distinción de los materiales del suelo que contiene cada horizonte del perfil. Cabe recordar que el Servicio de Conservación de Suelo de los Estados Unidos reconoce los siguientes tipos de estructura, determinada por comparación de un grupo representativo de elementos con un conjunto de diagramas estandarizados: aplanada, prismática, columnar, en bloques angulares, en bloques subangulares, granular, migajosa, de grano único y masiva. El tamaño o clase de los agregados puede ser: muy fino, fino, mediano, grueso y muy grueso. El grado se determina por la estabilidad o durabilidad relativa de los agregados y por la facilidad con que se disgregan; variando según el contenido de humedad del suelo y por lo general se define sobre un suelo casi seco y se designa por los siguientes términos: débil, moderado y fuerte.

A partir de los datos edafológicos y de la zonificación de la erodabilidad antecedentes en la cuenca, se caracterizó la relación entre estructura y materia orgánica para los distintos suelos, por medio de procesamientos matemáticos.

6. Aplicación del Método Número de Curva (CN) para identificar variación temporal de la escorrentía

La metodología del número de la curva (CN), del Soil Conservation Service (SCS) de los Estados Unidos, es la más empleada para transformar la precipitación total en precipitación efectiva, constituyéndose en una herramienta de gran valor a la hora de realizar estudios hidrológicos en cuencas hidrográficas, en las que no se cuenta con registros lo suficientemente extensos y confiables. Este método surgió de la observación del fenómeno hidrológico en distintos tipos de suelo en varios estados y para distintas condiciones de humedad antecedente.

CN es el Número de curva que expresa la relación existente entre la lluvia caída sobre una cuenca y la escorrentía recogida a la salida de la misma atendiendo a una serie de características de la misma cuenca (Carpena *et al.*, 2005). Se basa en la estimación directa de la escorrentía superficial de una lluvia aislada, a partir de las características del suelo, uso del

mismo y de su cubierta vegetal. Cada uno de los complejos suelo-vegetación se comporta de una misma forma frente a la infiltración. En un complejo suelo-vegetación totalmente impermeable toda la precipitación se convierte en escorrentía superficial. Por el contrario un complejo totalmente permeable no daría escorrentía fuera cual fuere el valor de precipitación.

A cada tipo de complejo suelo-vegetación se le asigna a un valor, llamado Número de Curva o Número Hidrológico (CN), que define sus condiciones hidrológicas, tabulado a nivel universal. Depende de las respuestas hidrológicas del complejo geomorfológico-edáfico o GH, expresado con anterioridad. El tipo de suelo es el que permite definir el potencial de generación de escorrentía, que es lo mismo su capacidad de infiltración. El tipo de uso del terreno reconoce, la capacidad de infiltración intrínseca del terreno, según introduzcan modificaciones, por sellado o impermeabilización, como el caso de zonas pavimentadas, o la mejoren como suelos forestales

El número de curva es un conjunto empírico de relaciones cuyos valores caen en el intervalo de 25 a 100, representando las condiciones de la superficie terrestre en función del uso del terreno, la permeabilidad del suelo y los antecedentes de humedad. Este a su vez proporciona una forma para estimar la cantidad de agua de lluvia que escurriría en un período de 24 horas a partir de datos de la precipitación y condiciones del sitio. Las propiedades hidrológicas del suelo y el uso del terreno se combinan para calcular el número de curva para un sitio que es usado para predecir la profundidad de escurrimiento para una profundidad de lluvia dada.

La representación gráfica de la precipitación (P) y su relación con el exceso de precipitación o escorrentía directa (P_e), (Figura 4), permitió obtener una familia de curvas que fueron estandarizadas en base de definir un número adimensional de curva CN. Entre los dos casos extremos se pueden tener infinitas respuestas de escorrentía superficial, ante una precipitación, según el tipo de asociación suelo-vegetación, que varía según sea el grado del escurrimiento directo. El número de la curva CN=100, indica que toda la lluvia escurre, la curva tiende asintóticamente a una inclinación de tangente igual a la unidad, significando que para valores muy altos de precipitación, el suelo está tan saturado de agua, que un incremento de lluvia se traduce en un incremento de la misma magnitud en escorrentía, y un CN=mínimo (25), indica que toda la lluvia se infiltra. El valor umbral de precipitación (10) se define como límite por debajo del cual toda la precipitación es interceptada por el complejo suelo-vegetación y por lo tanto la escorrentía superficial es nula.

Los números de curva se aplican para condiciones antecedentes de humedad normales (Condición II) ; para condiciones secas (Condición I) y para condiciones húmedas (Condición III) se calculan los números de la curva equivalentes. Los valores del número de la curva han sido tabulados en base al tipo de suelo y al uso de la tierra (Oñate, 2005). Estos contenidos iniciales de humedad, son estimados según la lluvia caída en los cinco días antes de la tormenta de diseño

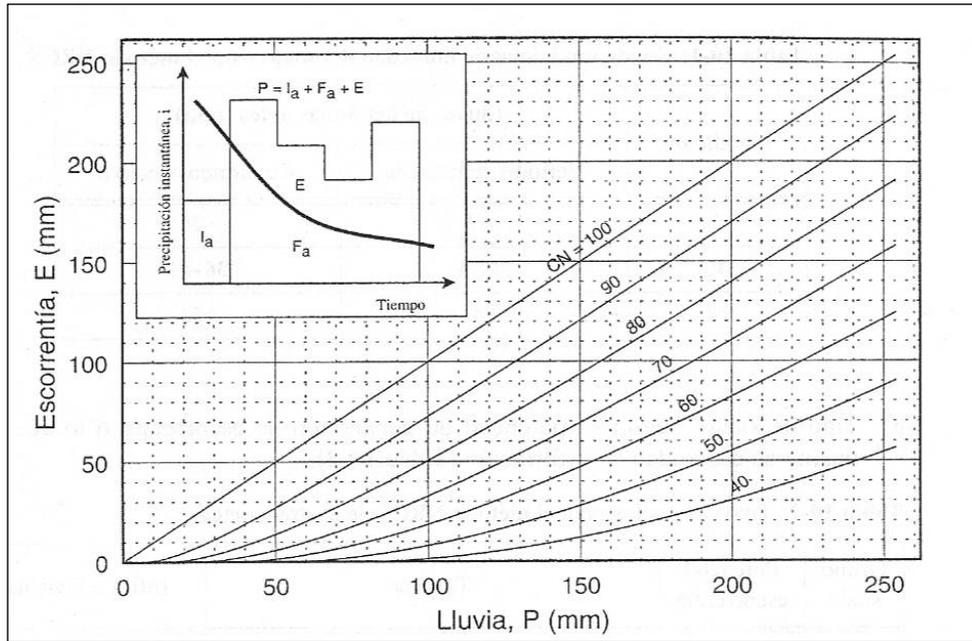


Figura 4: Relación entre precipitación y escorrentía para el método de abstracciones de NRCS (Adpt. de Schwab *et al.*, 1993).

A partir de la digitalización de las cartas edafológicas escala 1:50.000, correspondientes a Colonia Caa Guazú (Nº 2757-31-1) y Leandro N. Alem (Nº 2754-25-3) (C.A.R.T.A., 1964), se generó un mapa temático de tipos de suelo de la cuenca, de acuerdo a la clasificación de FAO, el cual se transformó a un formato raster y se reclasificó con base a los cuatro grupos hidrológicos de suelo (Tabla 5). El mapa resultante se combinó con los mapas temáticos de cobertura del terreno de cada año (por la aplicación de una superposición cartográfica) y a cada combinación se le asignó el número de curva correspondiente (Berlanga, et al, 2005), De esta manera se generó la zonificación del CN en la cuenca en estudio.

La capacidad de abstracción de un suelo y por lo tanto de generación de escorrentía depende, de las características establecidas para CN, por lo cual se cuantifica por medio del factor S. Este significa que debe caer una precipitación $0,2 * S$ en la cuenca antes de producirse la escorrentía, la abstracción potencial (S (mm)).

La determinación de los números de curva en la cuenca del Arroyo Itacaruaré se estableció luego de definidos los escenarios suelo-vegetación. Para ello se tomó en cuenta que el número de curva tuviera relación con la mayor o menor escorrentía provocada según el tipo de vegetación. Posteriormente se calculó el parámetro S que corresponde a la máxima infiltración del suelo, y el umbral de escorrentía lo (López 1998). El S se puede estimar como se expresa en la fórmula 18.

$$S = 254 * \left(\frac{100}{N}\right) - 1$$

Fórmula 18: Abstracción potencial.

$$I_0 = 0,2 * S$$

Fórmula19: Máxima infiltración del suelo.

Con esta información se determinó las precipitaciones efectivas según las fórmulas 20

$$Q_i = 0 \quad \text{Si } \sum P \leq 0,2 * S$$

$$Q_i = \frac{(P_j - 0,2 * S)^2}{(\sum P_j + 0.8 * S)} - Q_{(i-1)} \quad \text{Si } \sum P > 0,2 * S$$

Fórmula 20: Precipitaciones efectivas

7. Comprobar la variación temporal – espacial del escurrimiento superficial en la Cuenca del Arroyo Itacaruaré por medio del coeficiente de escorrentía.

A causa de que la erosión hídrica está estrechamente relacionada a la escorrentía, ya que incrementos en la escorrentía, también se traducen en incrementos en la erosión. El proceso avanza exponencialmente, y su reversión puede resultar económicamente imposible si el problema no es detectado y controlado adecuadamente (CIDIAT, 1991). Cabe señalar que la erosión hídrica es el proceso que produce la pérdida de la superficie del suelo debido al cambio de sus características físicas, químicas y biológicas por la continuidad de las fases de separación, transporte y sedimentación activadas por la lluvia y principalmente por la erosividad de la escorrentía (Colotti, 2004).

Esta erosividad de la escorrentía puede evaluarse por medio del coeficiente de escorrentía (CE) de una superficie, como el cociente del caudal que discurre por dicha superficie (Q), en relación con el caudal total precipitado (P) (Fórmula 21).

$$CE = Q * P^{-1}$$

Fórmula 21: Coeficiente de escorrentía.

Este coeficiente de escorrentía puede variar a lo largo del tiempo y es función de las características del terreno (vegetación, permeabilidad, pendiente, humedad inicial del suelo, entre otros factores) y de la región donde esté situada la cuenca (temperatura, intensidad y duración de la precipitación, humedad relativa, velocidad del viento, superficie de la cuenca).

Existen tablas que determinan coeficientes de escurrimiento teniendo en cuenta solo el tipo de terreno y la cobertura vegetal. La mayoría de estas tablas no tienen en cuenta que el proceso de escurrimiento depende fundamentalmente de la precipitación y de la condición de humedad antecedente. Es por esto que partir de la relación existente entre el coeficiente de escurrimiento (CE) y el número de curva (NC) puede obtenerse tablas más confiables que sustituyan a las tradicionales.

Desde el punto de vista geográfico climático, al estudiar la erosividad y el coeficiente de escorrentía, se puede profundizar en el conocimiento de la agresividad climática, por medio de la siguiente secuencia metodológica:

- Explicar y diferenciar las características (energía e intensidad) y comportamiento (fenómenos extraordinarios) de la precipitación en el tiempo y en el espacio cuenca hidrográfica, por medio del coeficiente de escorrentía.
- Conocer los eventos extraordinarios, que son la base para evaluar los cálculos del trabajo hidráulico de la lluvia y guiar para la conservación del suelo y del agua.
- Zonificar el CE por medio de la diferenciación de áreas de acuerdo a su potencial erosivo, mediante su representación cartográfica.

8. Formulación de diferentes medidas conservacionistas para el control de la escorrentía superficial según uso actual de suelo.

En cuanto a la importancia de conocer la magnitud de la erosividad de las precipitaciones de un lugar o un área, es necesario conocer su uso presente y futuro.

Desde el punto de vista agronómico, Wischmeier y Smith (1958) consideraron la importancia de la aplicación del Índice de Erosión Pluvial (R), que permite:

- Predecir la pérdida de suelo con la menor cantidad de variables y por lo consiguiente, en menor tiempo.
- Clasificar las tormentas según su potencial erosivo asociado a los efectos de la pendiente, cobertura y manejo.
- Planificar prácticas de conservación del suelo incluyendo la erosividad de las lluvias.
- Evaluar el efecto de la cobertura y manejo con relación a la severidad de las tormentas.

9. Identificar áreas potenciales para la implementación del sistema silvopastoril como medida conservacionista en la Cuenca del Arroyo Itacaruaré.

Los árboles pueden formar parte de un sistema agrario, plantándolos en los suelos que no son adecuados para la producción agrícola. Cuando los árboles están integrados con los cultivos, la ganadería o ambos, para aprovechar interacciones que se esperan que sean positivas entre las arboledas y otros usos de la tierra, se definen como sistemas agroforestal y/o silvopastoril (Lundgren y Nair, 1985).

Lo agroforestal se está estimulando en muchos países como un medio de modificar los sistemas agrarios actuales para mejorar la fertilidad del suelo, controlar la erosión y diversificar las fuentes de ingresos. (Morgan 1997)

Los sistemas silvopastoriles son muy importantes, tanto desde el punto de vista productivo como ambiental, aunque todavía no han alcanzado un nivel de adopción considerable. Estos sistemas presentan mayores oportunidades para el incremento de la productividad, especialmente en ganadería, sin embargo, se hace necesario acumular mayor información sobre la interacción planta – animal y el impacto económico y ambiental de esa interacción (Devendra e Ibrahim, 2002).

Los beneficios que los productores perciben en los sistemas silvopastoriles son varios: mayor rentabilidad; microclima mejorado para el ganado y el pasto como protección a bajas y altas temperaturas en invierno (heladas) y verano (stress térmico), flujo de ingreso económico favorable incluyendo una inversión de largo plazo y rentas de corto plazo, reducido riesgo de incendio forestal y reducida cantidad de malezas. Los aspectos negativos principales son: la competencia que ocurre entre los árboles y el forraje, y la complejidad del manejo que esta competencia crea (Frey *et al.* 2008).

Lo que se busca es restaurar o aumentar su capacidad de productiva tratando de mejorar sus niveles de materia orgánica, su infiltración, porosidad, estructura, capacidad de almacenamiento de agua y actividad biológica. Por ello, en estos sistemas de producción “no valen recetas”, sino, el enfoque tecnológico debe responder a las condiciones locales, donde el factor socio-económico también debe ser considerado dentro del nuevo modelo productivo.

En relación a los sistemas silvopastoriles, las características principales son:

- Existe evidencia de que la plantación de árboles de rápido crecimiento en áreas de potreros disminuirá el flujo superficial después de que el dosel de copas se cierre.
- En muchas partes de los trópicos húmedos donde se ha talado indiscriminadamente el bosque natural, ha llevado a una degradación de los suelos muy seria, a una alteración de los regímenes del escurrimiento superficial (Hamilton y King, 1983).
- La vegetación actúa como una capa protectora o amortiguadora entre la atmósfera y el suelo. Los componentes aéreos, como hojas y tallos, absorben parte de la energía de las gotas de lluvia, del agua en movimiento y del viento, de modo que su efecto es menor que si actuara directamente sobre el suelo, mientras que los componentes

subterráneos, como los sistemas radicales, contribuyen a la resistencia mecánica del suelo (Morgan, 1997).

- La cobertura vegetal, cuando cubre una proporción suficiente de la superficie del suelo, puede jugar un papel importante en la reducción de la escorrentía. La cubierta forestal es la más efectiva, pero una densa cubierta herbácea puede tener casi la misma eficiencia y se obtiene más rápidamente (Morgan, 1997).
- Los bosques mantienen altas tasas de evapotranspiración, intercepción e infiltración y consecuentemente generan pequeñas escorrentías.

A partir de los beneficios ya demostrado de los sistemas agroforestales y silvopastoriles se zonificará la Cuenca del Arroyo Itacaruaré para la implementación de estos sistemas como medida conservacionista para su protección y restauración.

10. Establecer la escorrentía superficial por la aplicación del simulador de lluvias para los distintos usos del suelo de la cuenca en estudio.

El uso y aplicación del simulador de lluvias para determinar la escorrentía superficial para los distintos usos del suelo de la Cuenca del Arroyo Itacaruaré es una etapa que este estudio, debido a la imposibilidad económica y operativa de realizar los ensayos, no ha podido llevar a cabo. Cabe destacar que considerando los resultados obtenidos en los incisos de 1 a 9 donde se expresa la baja escorrentía general, se observó que el desarrollo de esta práctica generaría altos costos ejecutivos y vanos resultados.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

1. Recopilación de antecedentes

1.1 Clima

Los datos fueron obtenidos de la Estación Meteorológica de la Estación Experimental de la E.E.A. Cerro Azul dicha estación contaba con un informe detallado (Informe Técnico N°68 elaborado por el Técnico Sr. Olinuck) en los cuales se realizó una actualización al año 2007, de los datos de los años 1967-1996, a partir de dicho informe y con la base de datos proporcionados por dicha estación. Se analizó con el programa Excel. De las temperaturas máximas absolutas, medias mensuales, máximas medias, mínimas medias y mínimas absolutas, de los cuales se tuvieron en cuenta para su estudio los valores extremos medios y mínimos de cada una de las variables, realizando su correspondiente gráfico para una mejor visualización e interpretación de los mismos.

1.1.1. Temperaturas de Cerro Azul, Período 1967-2007

Temperatura Máximas Absolutas

La temperatura máxima absoluta anual del período 1967-2007 se registró en el mes de diciembre del año 1985 con un valor de 41,4 °C, distribuyéndose en los años restantes en el rango de los 35°C y los 40°C, registrándose como la mínima 35,2°C en el año 1976. Mientras que la temperatura mínima de la máxima anual se mantuvo en el rango de los 25 °C y los 30 °C (Gráfico 4).

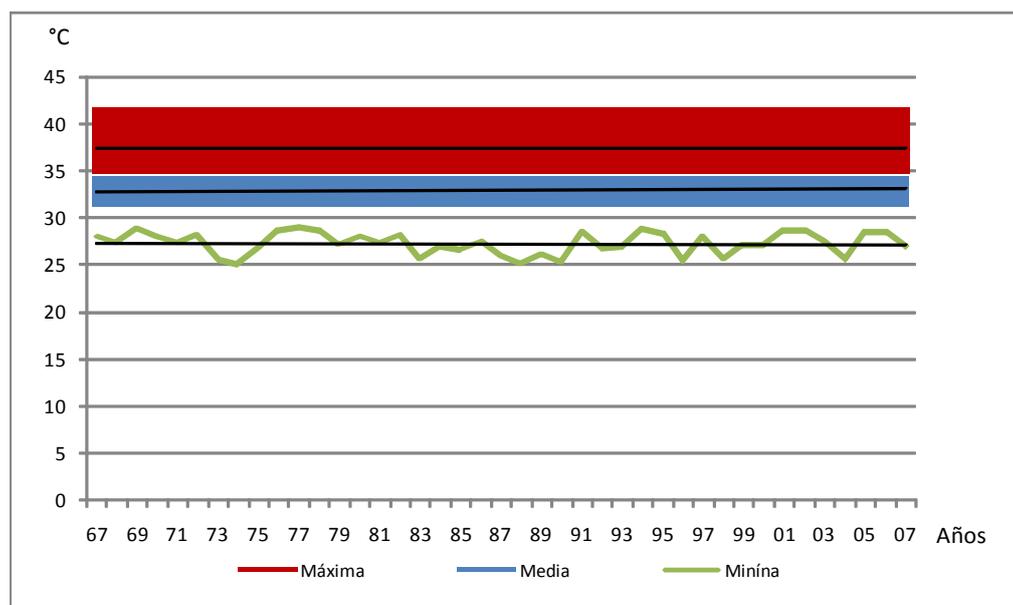


Gráfico 4: Distribución de Temperaturas Máximas Absolutas Anuales del período 1967-2007.

La media máxima absoluta anual esta en el rango de los 30°C y los 35°C, con una amplitud térmica de 2,8 °C, para el período de estudio completo (Gráfico 4).

La mínima absoluta anual se registró el en mes de junio de 1974 con un valor de 25°C. , manteniéndose los restantes años en un rango de 25°C y 35°C (Gráfico 4).

En el gráfico 4 se observa que la máxima presenta una tendencia en aumento y la mínima tiende a disminuir, y contrarrestando la media expresa una tendencia a aumentar. Debido a ello, se concluye que en el período de estudio se presenta un leve aumento de las temperaturas máximas absolutas.

Las temperaturas máximas absolutas extremas mensuales se mantuvieron en el rango de los 35°C y 40°C en los meses de enero, febrero, marzo septiembre y octubre, en los meses de abril, mayo julio y agosto en el rango de los 30°C y 35°C., conservándose estas temperaturas en un rango de los 30°C y 40°C. El siendo el mes de diciembre el que presentó mayor temperatura con valor de 41,1 °C (Gráfico 5).

Las medias máximas absolutas mensuales superaron los 35°C, en el período comprendido entre noviembre y febrero. En los meses de marzo, abril, octubre y noviembre se ubicaron entre los 30°C y 35°C, presentando la mínima media máxima en el mes de junio, con un valor de 27,8°C. y la máxima media máxima en el mes de enero con un valor de 36,3°C. (Gráfico 5).

Las temperaturas mínimas de las máximas mensuales se mantienen un en rango de los 35°C y 25°C, siendo marzo junio y julio los meses que presentan menor valor. El mes de enero produce la temperatura máxima mínima con un valor de 33,5°C y una mínima en el mes de junio con un valor de 25°C (Gráfico 5).

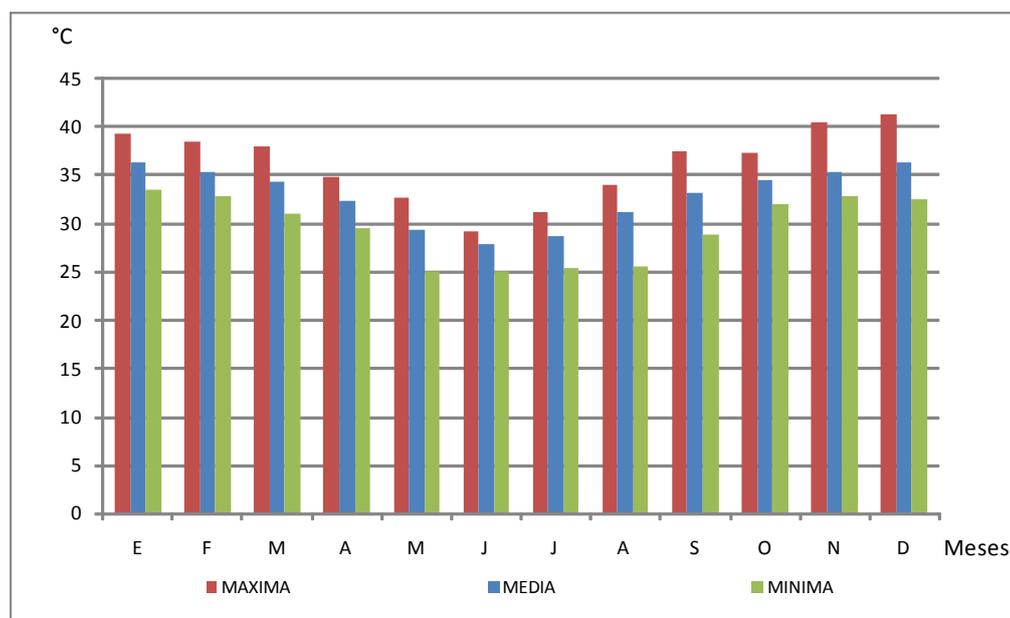


Gráfico 5: Distribución de la Temperaturas Máximas Absolutas Mensuales del período 1967-2007.

La amplitud térmica para las temperaturas máximas absolutas mensuales fue de 12,1 °C y para media y mínimas de 8,5°C.

Temperaturas Medias Mensuales

La temperatura máxima anual de la media mensual del período 1967-2007 se registró en el mes de diciembre del año 1985 con un valor de 28,2°C, ubicándose en los años restantes en el rango de los 25°C y los 30°C. Mientras que la temperatura mínima de la media mensual se registró en el año 2000 con un valor 12,2°C, en el mes de junio (Gráfico 6).

La máxima media anual esta en el rango de los 20°C y los 25°C con una amplitud térmica de 1,8 °C, no superando los 5°C (Gráfico 6).

En el siguiente gráfico 6, las tres variables, temperatura máxima, media y mínima muestran una tendencia leve al aumento durante el período analizado, con lo que las temperaturas medias aumentarían a lo largo de los años.

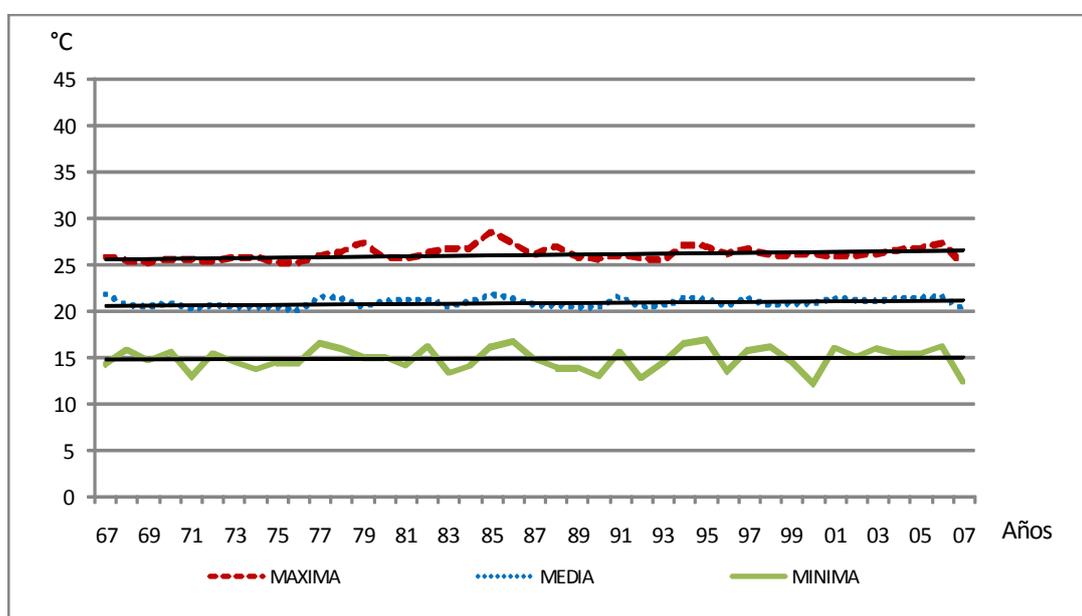


Gráfico 6: Distribución de las Temperaturas Máximas medias Mensuales del Período 1967-2007.

Las temperaturas medias mensuales extremas alcanzaron un valor de 28,6 °C, en el mes de diciembre. Durante los meses de enero, febrero, marzo, noviembre y diciembre se presentan en un rango de los 25°C y 30°C, desde el mes de abril a octubre se mantienen en un rango de los 19°C y 25° C siendo junio el mes de menor temperatura con 19,1°C (Gráfico 7).

Analizando las medias mensuales, la máxima temperatura se produjo en el mes de diciembre presentando un valor de 25,7°C., siendo los meses de enero y febrero que también superaron los 25°C. Los meses de marzo abril octubre y noviembre se encuentran en un rango de los 20°C y 25°C los meses restantes no alcanzaron los 20°C siendo junio y julio los de menor temperatura con un valor de 15,9°C (Gráfico 7).

Las temperaturas medias mínimas mensuales se presentan en un rango de los 20°C y 25°C durante los meses de enero, febrero, marzo, noviembre y diciembre, mientras que los restantes meses no superan los 20°C, presentándose julio como el mes más frío con 12,2°C (Gráfico 7).

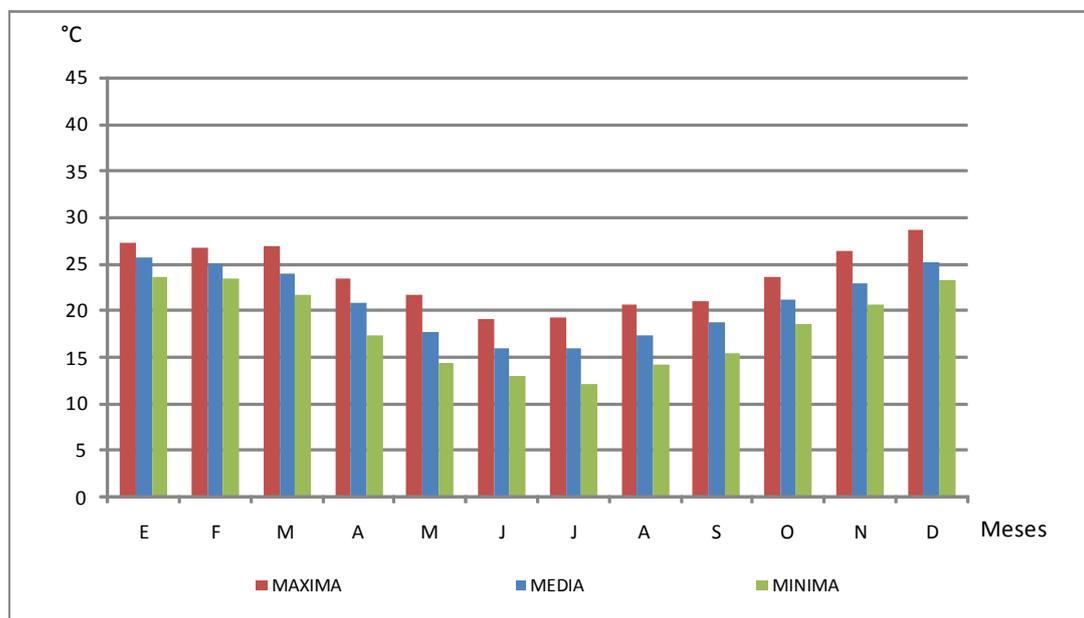


Gráfico 7: Distribución de las Temperaturas Medias Mensuales del período 1967-2007.

Temperatura Máximas Medias

La temperatura máxima de la máxima media anual se registró en el mes de diciembre del año 1985 con un valor de 36,2°C, y un valor mínimo de 30,4°C en el mes de diciembre de 1976. Situándose los años restantes en el rango de los 30°C y 35 °C.

La temperatura media de la máxima media anual presenta una amplitud térmica de tan solo 2,1°C donde la media máxima se presentó en el año 1991 con un valor de 27,4°C y la media mínima con 25,2°C en el año 1998.

Las temperaturas mínima de la máxima de la media anual registro su mayor valor de 22,4°C en el año 1986, un valor mínimo de 17,8°C en el mes de julio de 1992 (Gráfico 8).

En el gráfico 8 se puede observar que la máxima tiene una leve tendencia a aumentar, que la mínima una leve tendencia a disminuir y la media da una tendencia a aumentar.

Por lo tanto se identifica un leve aumento de las temperaturas máximas absolutas a lo largo de los años y una leve disminución de las mínimas de las máximas absolutas expresando un aumento de la amplitud térmica.

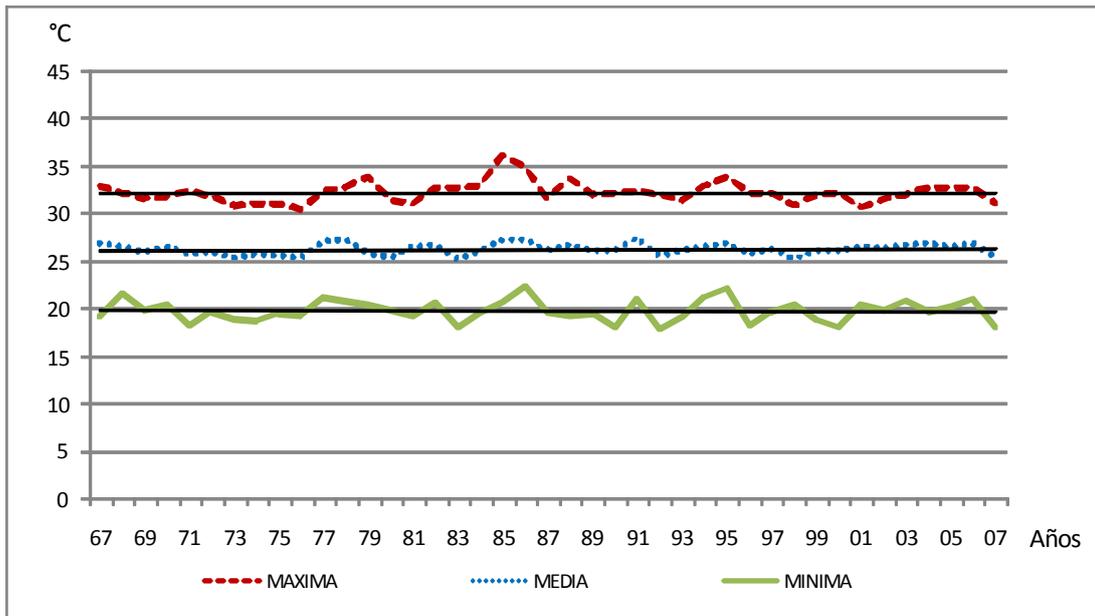


Gráfico 8: Distribución de las Temperaturas Máximas Medias Mensuales Anuales del período 1967-2007.

Las temperaturas máximas media mensuales presentaron su máxima temperatura en el mes de diciembre de 1985, y un valor mínimo de la máxima de 23,6°C en el mes de junio. Las temperaturas de las máximas medias mensuales presentan una amplitud térmica de 12,6°C (Gráfico 9).

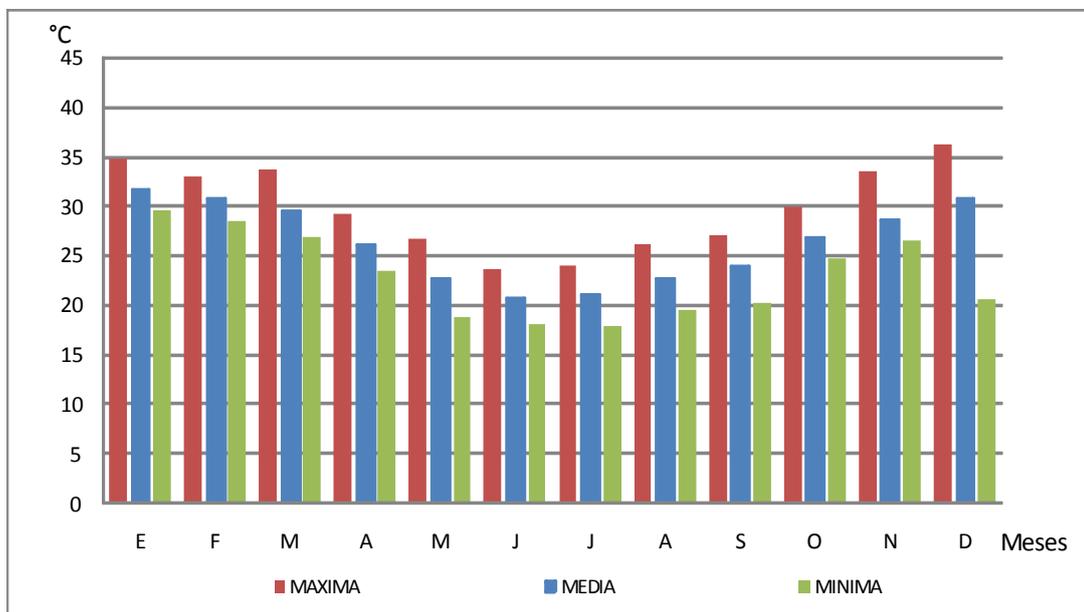


Gráfico 9: Distribución de la Temperatura Máximas Mensuales del período 1967-2007

Por otro lado, la media de la máxima de la media mensual tiene un máximo de 31,6°C como valor máximo y 20,7°C como valor mínimo presentándose en los meses de enero y junio respectivamente.

Las mínimas de la máxima de las medias registraron valores de 29,6°C como máxima en el mes de enero y de 17,8°C como mínima en el mes de julio.

La amplitud térmica de las máximas medias se encuentra en un valor entre los 12,6°C y los 11,8°C. (Gráfico 9)

Temperaturas Mínimas Medias

La máxima temperatura mínima media anual se registró en el mes de enero de 2006 con un valor de 22,6°C, y la mínima en el mes de febrero del año 1967 con un valor de 19,6°C. La máxima temperatura mínima tiene un rango de amplitud térmica de 3,0°C.

La media de la mínima media anual tiene su valor máximo de 17,0°C y su valor mínimo de 15,0°C registrándose en los años 1977 y 1975 respectivamente. Su amplitud térmica es de 2,0°C.

La mínima de la mínima media anual presentan una mayor amplitud térmica de 5,7°C siendo su valor máximo en el año 1994 y su valor mínimo 6,8°C registrándose en el año 2000.

Con lo que se puede concluir que en los años de estudios 1967-2007 la temperatura mínima registrada a lo largo de los años fue de 22,6°C en el año 2006 y de 6,8°C como valor mínimo en el año 2000 (Gráfico 10).

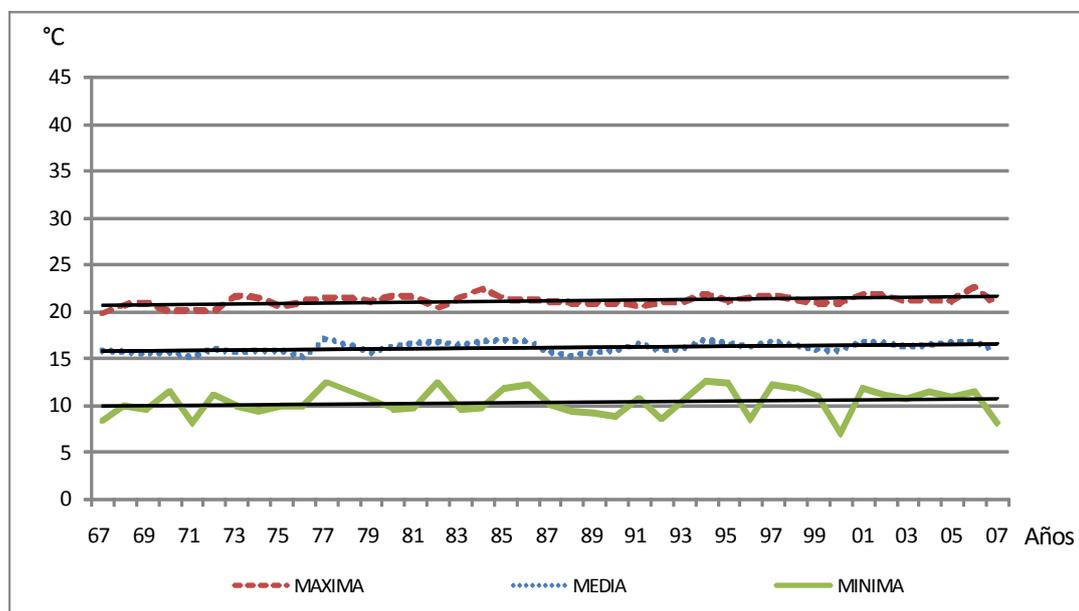


Gráfico 10: Distribución de las Temperaturas Mínimas Medias Anuales del período 1967-2007.

En cuanto al comportamiento de las variables a lo largo de los años se observa que tanto la máxima, la mínima y la media de las mínimas medias tienen una tendencia a aumentar, con lo que se esperaría mayores temperaturas mínimas en un futuro.

Las temperaturas mínimas medias mensuales de los años en estudio presentan un valor máximo de 22,6°C en el mes de enero y de 6,8°C en el mes de julio.

La máxima de la temperatura mínima media mensual fue de 22,6°C que se presentó en el mes de enero y una mínima de 15°C en el mes de julio. Con lo que su amplitud térmica es de 7,6°C.

La media de la mínima media mensual posee un valor máximo de 20,6°C y un valor mínimo de 11,5°C, teniendo una amplitud térmica de 9,1°C.

La mínima de la mínima media mensual tuvo su valor máximo en el mes de febrero con un valor de 18,4°C y un valor mínimo de 6,8°C en el mes de julio. Su amplitud térmica de 11,6°C que implica que las temperaturas mínimas tienen una mayor variación a lo largo del año (Gráfico 11).

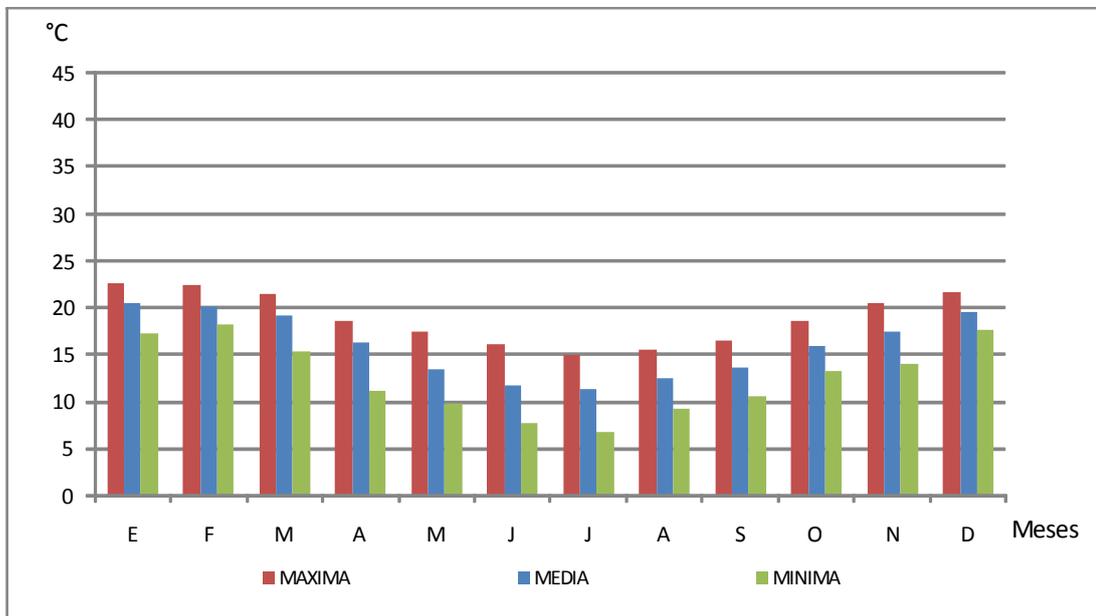


Gráfico 11: Distribución de la Temperatura Mínimas Medias Mensuales del período 1967-2007.

Temperatura Mínima Absolutas

La temperatura mínima absoluta anual se registró en el mes de febrero del 2001 con un valor de 19,1°C, ubicándose en los años restantes en el rango de los -5°C y 20°C. Mientras que la temperatura mínima de la mínima absoluta anual se registró en el mes de julio de 1975 con un valor de -3,9°C.

La máxima de la mínima absoluta anual se registro en el año 2001 con un valor máximo de 19,1°C y un valor mínimo de 14,4°C en el año 1969. La máxima presenta una amplitud térmica de 4,7°C.

La media de la mínima absoluta anual tiene un valor máximo de 10,2°C y de 7,5°C registrándose en los años 1978 y 1976 respectivamente. La media tiene una amplitud térmica de 2,7°C.

La mínima de la mínima absoluta anual es la que presento la mayor amplitud térmica de 8,7°C. Siendo su valor máximo de 4,8°C y su mínimo de -3,9°C que se registraron en los años 1998 y en 1975 respectivamente (Gráfico 12).

En el gráfico de la temperatura mínimas absolutas se demuestra que las temperaturas máximas, media y mínimas de la mínimas absolutas tienen una tendencia leve a aumentar, aunque esté presente el pico mínimo de -3,9°C, por lo tanto se esperaría que las mínimas aumenten muy tenuemente a lo largo de los años.

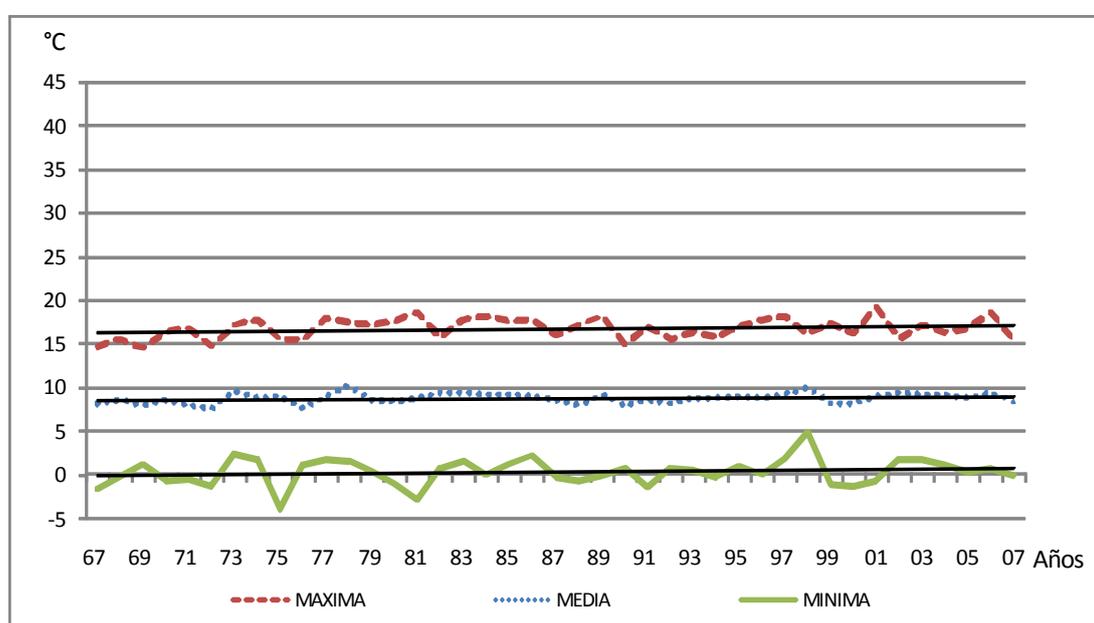


Gráfico 12: Distribución de las Temperaturas Mínimas Absolutas Anuales del período 1967-2007.

Las temperaturas mínimas absolutas mensuales tuvieron su valor máximo 19,1°C en el mes de febrero de 2002 y su mínima de -3,9°C en el mes de julio de 1975. Por lo tanto su rango de temperaturas es de 23,0°C.

La máxima temperatura mínima absoluta fue de 19,1°C y su mínima de 7,0°C en julio teniendo una amplitud térmica de 12,1°C.

La media temperatura de las mínimas absolutas tiene un valor de 15,4°C en el mes de enero y de 1,9°C en el mes de julio. Son lo que su amplitud térmica es de 13,4°C.

La mínima de la mínima absoluta mensual es registro como valor máximo 11,0°C en el mes de enero y como mínimo -3,9°C en el mes de julio, con lo que su amplitud térmica es de 14,9°C, siendo esta la mayor amplitud que se presentan. (Gráfico 13).

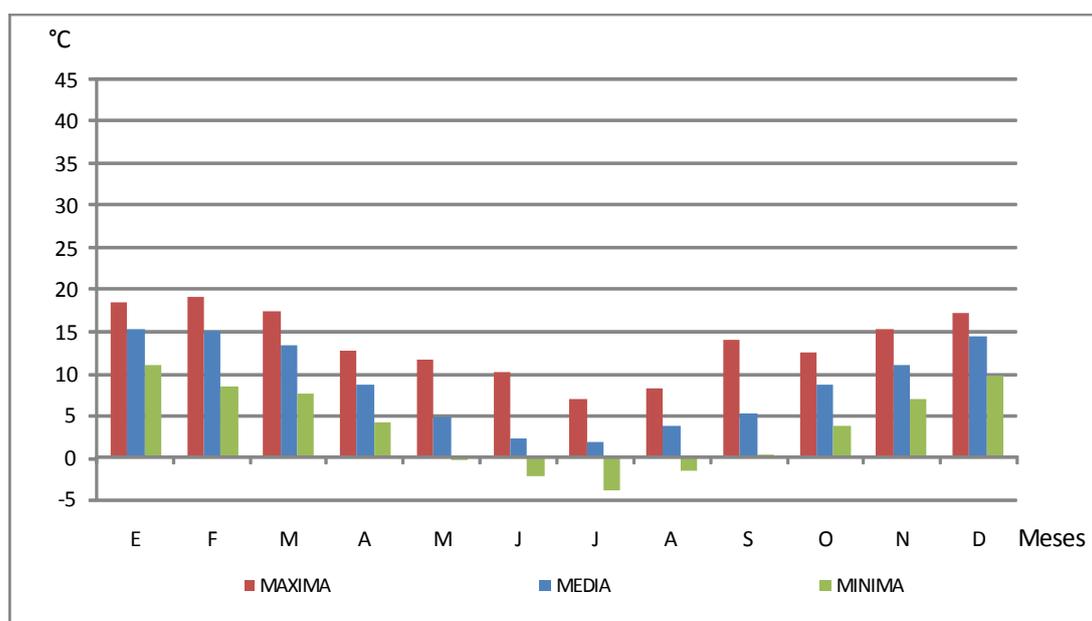


Gráfico 13: Distribución de las Temperaturas Mínimas Absolutas Mensuales del Período 1967-2007.

Se puede concluir con respecto a las temperaturas de Cerro Azul para los años en estudio 1967-2007 que cuando se analizó anualmente la tendencia, se observó poca variación a lo largo de los años, estado está en aumento estableciendo que durante el año los meses tienen una mayor fluctuación en los parámetros estudiados.

1.1.2. Precipitaciones de Cerro Azul Período 1967-2006

Se efectuó un análisis de los datos de la Estación Agrometeorológica de la E.E.A. Cerro Azul para la serie de los años 1967 - 1996. Se realizó una actualización de dicha serie al año 2006. Para el procesamiento se tuvo en cuenta la información los valores diarios mensuales y anuales de los datos de precipitación obteniéndose: **Precipitaciones extremas mensuales y anuales, Precipitaciones medias mensuales y anuales.**

Precipitaciones Anuales

Las precipitaciones registradas en la Estación Agrometeorológica de la E.E.A. Cerro Azul durante los años 1967-2006, muestran una tendencia a un aumento anual de las lluvias caídas a lo largo de los años.

El rango en el que se observan las precipitaciones medias es el 1500 mm -2500 mm. Como puede verse en el gráfico 14 los años en los cuales no se alcanzó los 1500 mm., fueron 1967, 1978, 1981, 1995, 2004, siendo la mínima precipitación anual de 1120 mm ocurrida en el año 2004. Por otro lado puede observarse en el gráfico que los años que presentaron lluvias mayores a los 2500 mm fueron 1972, 1983, 1986, 1987, 1998, 2002, siendo el año 1983 el que registró la máxima precipitación anual con un valor de 2756,4 mm y continuado por el año 2002 con 2744,0 mm.

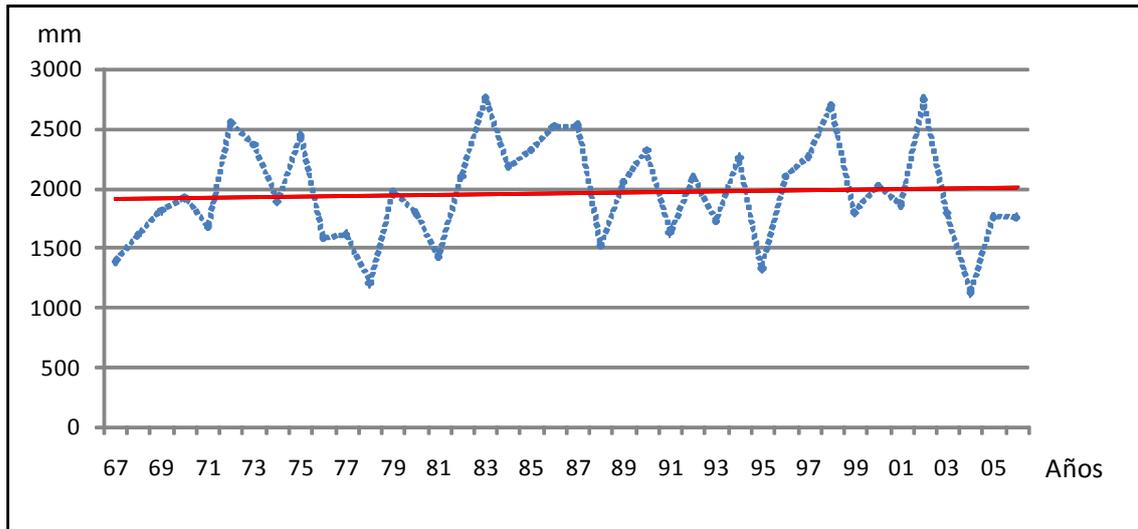


Gráfico 14: Distribución de la Precipitaciones Totales Anuales del período 1967-2006.

Analizando las precipitaciones de los años 1987-2006, de las cuales se tiene un registro con las bandas pluviográficas, se puede observar que en los últimos 20 años la tendencia de las precipitaciones cambia, la precipitación anual total disminuye a lo largo de los años (Gráfico 15).

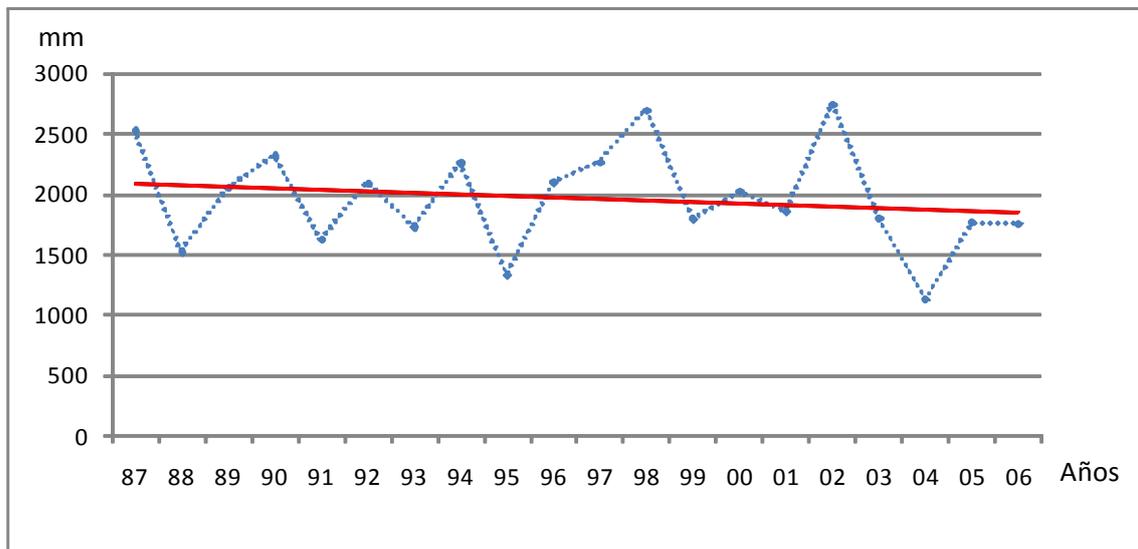


Gráfico 15: Distribución de la Precipitaciones Totales Anuales del período 1987-2006.

Precipitaciones mensuales

Analizando como ocurren las precipitaciones a lo largo del año, teniendo en cuenta los datos de los años 1967-2007, puede observarse que las máximas precipitaciones están en un rango de los 300 mm y los 600 mm, teniendo dos picos marcados de mínima que registran en los meses de marzo y septiembre, y con tres picos de máxima que se observan en los meses de abril, mayo y noviembre. La mínima registrada es de 229,3 mm en el mes de septiembre y la máxima de 559 mm en el mes de noviembre.

La media de las precipitaciones mensuales se encuentra en un rango de los 100mm y los 200 mm exceptuando el mes de octubre que tiene una media de 214,5 mm.

Las mínimas van de 0 mm a 10 mm, siendo el mes de agosto el cual presenta la menor cantidad de lluvia con tan solo 3,9 mm.

Puede observarse que los meses que presentaron un mayor valor de la máxima, fueron después de los meses que registraron un mínimo valor de la máxima

Por otra parte marzo y octubre son los que presenta una menor amplitud térmica. El mes de abril y noviembre son los que tienen la mayor amplitud. (Gráfico 16).

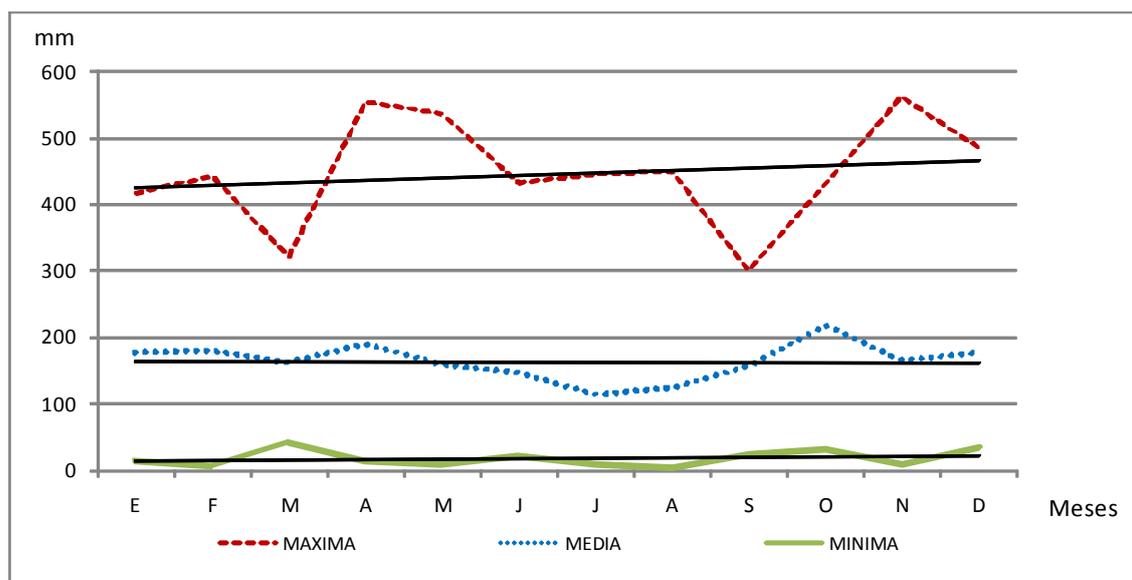


Gráfico 16: Distribución de las Precipitaciones Mensuales a lo largo del año del período 1967-2006

Totales mensuales de precipitaciones pluviales de Cerro Azul

Haciendo una análisis más detallado de lo que ocurre en cada mes a lo largo de los años, puede verse que los meses de abril, octubre y diciembre son los que muestran una tendencia en aumento muy marcada, los meses de febrero, septiembre y noviembre mantienen la cantidad de lluvia mensual a lo largo de los años y los meses restantes tienen una leve tendencia a disminuir la precipitaciones mensuales. A continuación se presenta una descripción del análisis realizado en forma mensual.

- El mes de enero se mantiene a lo largo de los años en un rango de los 13,3 mm- 400 mm., sin tener en cuenta el año 1973 en el cual alcanzo un valor de 415,5 mm., muestra una tendencia de disminución en la cantidad precipitaciones.
- Febrero tiene un comportamiento constante a lo largo de los años en el cual se mantiene en un rango de los 6,6 y los 400 mm, con excepción del registro de 441,8 mm que se encuentra en concordancia con el año 1983 en el que se observó la máxima precipitación anual de los años 1967-2007.

- Marzo tienen un comportamiento regular en el ciclo de estudio no pudiéndose observar picos de máximas y de mínimas. Tiene una amplitud pluvial de 276,6 mm
- Abril se caracteriza por tener una tendencia muy marcada de aumento de las precipitaciones a lo largo del ciclo de estudio. Este mes tiene un rango de los 15,5 a 400mm sin tener en cuenta los años 1983 y 1998 en los cuales se registro un precipitación de 435,4 y 551,4 respectivamente. Estos años en el cual supero los 400mm también fueron los años que presentaron máxima precipitación.
- El mes de mayo tiene una tendencia a disminuir la precipitación a lo largo de los años aunque puede observarse que durante los primero años su tendencia era a aumentar la cantidad de lluvia y a partir de año 1983 en el cual tuvo un pico máximo de 534,2 mm su tendencia es a disminuir manteniéndose en el rango de los 0 mm y 300mm. Este mes junto con abril colaboraron en el pico máximo que se produjo en el año 1983.
- El mes de junio solo manifiesta una leve tendencia a disminuir la cantidad de lluvia. Su máximo se registro en el año 1972 con total de 430,0 mm de precipitaciones, en los años restantes se mantiene en un rango que va de los 39,1 mm a 300 mm. Teniendo un comportamiento regular.
- El mes de julio al igual de mes de mayo, tienen una tendencia a disminuir la cantidad de lluvias, pero en los últimos 20 años, su rango disminuyo de 8,5mm- 300 mm a 8.5 mm 200mm después del pico en el año 1987 de 442, 0 mm año en el cual se registro el pico máximo anual de 1987 con un valor de 2527,4.
- Agosto tiene un comportamiento que se mantiene a lo largo de los años que va en disminución de la cantidad de lluvia mensual, no superando los 300 mm, con excepción del año 1972 en el cual alcanzo su máximo con un valor de los 449,0 mm., y siendo este mes junto con junio los que manifestaron su pico en el año 1972 en el cual se supero la media de las máxima anual con un valor de 2545,6mm.
- Es mes de septiembre tiene la mínima amplitud pluvial con un valor de 273,4 mm, y su comportamiento a lo largo de los años es regular teniendo un rango de 25,9 mm y 300 mm.
- Octubre se caracteriza por una marcada tendencia en aumento a lo largo de los años, manifestándose de manera regular, con lo cual no se observan años atípicos en los últimos 40 años.
- El mes de noviembre la precipitaciones se mantiene en un rango de 7,9 mm y los 300 mm, con un comportamiento regular, pero se pueden observar tres años en los cuales se supero los 300 mm, siendo el del año 1983 el máximo, con un valor de 559,3 mm., contribuyendo junto con abril y mayo los meses que contribuyeron a el pico máximo del año 1983.

- Diciembre presenta una tendencia marcada al aumento de las precipitaciones mensuales. Teniendo en los últimos años sus pico máximos que superan los 400mm.

Se concluye que la tendencia a disminuir la cantidad de lluvia de los últimos años, puede deberse a la tendencia a disminución de los meses, aunque las precipitaciones en los meses de abril octubre y noviembre tiendan a aumentar. Con excepción de los meses de marzo y septiembre que tienen un comportamiento predecible, en los meses restantes se puede producir pico de lluvias mensuales que salga del rango normal del mes (Gráfico 17).

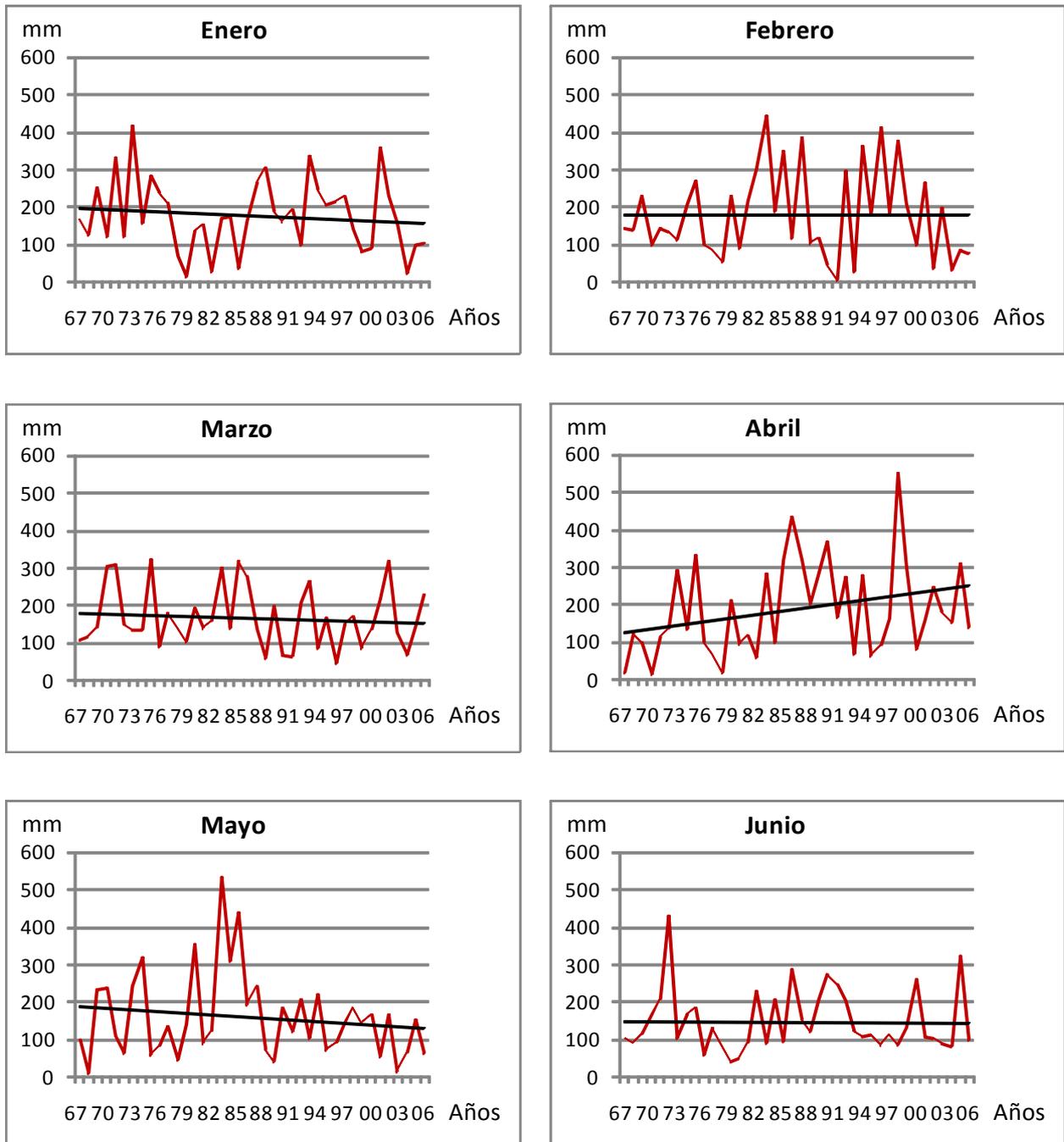


Gráfico 17: Precipitaciones mensuales en el período 1967 – 2007

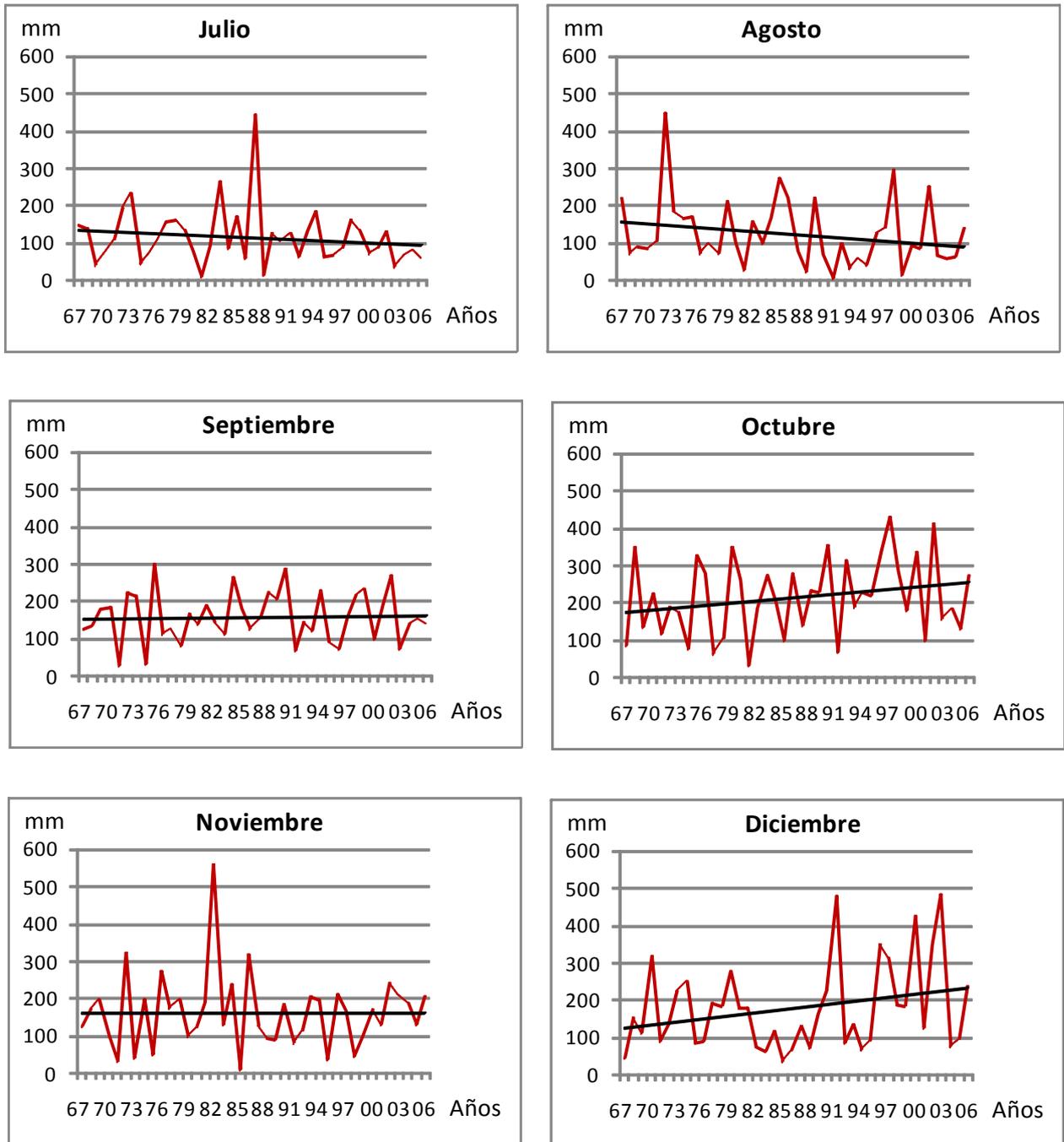


Gráfico 17: Precipitaciones mensuales en el período 1967 – 2007. Continuación.

Mayores precipitaciones diarias

Realizando un análisis de las tormentas de manera individual de cada mes a lo largo de los años 1967- 2007 puede observarse en el gráfico 18 que , las máximas de las mayores precipitaciones se encuentra en un rango de los 100 mm y los 200 mm exceptuando los meses de enero, mayo octubre y diciembre en los cuales supero los 150 mm, registrando la máxima tormenta en enero con un valor de 193,0 mm en el en el mes de mayo de 191,1, las mínimas tormentas de las máximas se registran en los meses de marzo, junio, septiembre y noviembre.

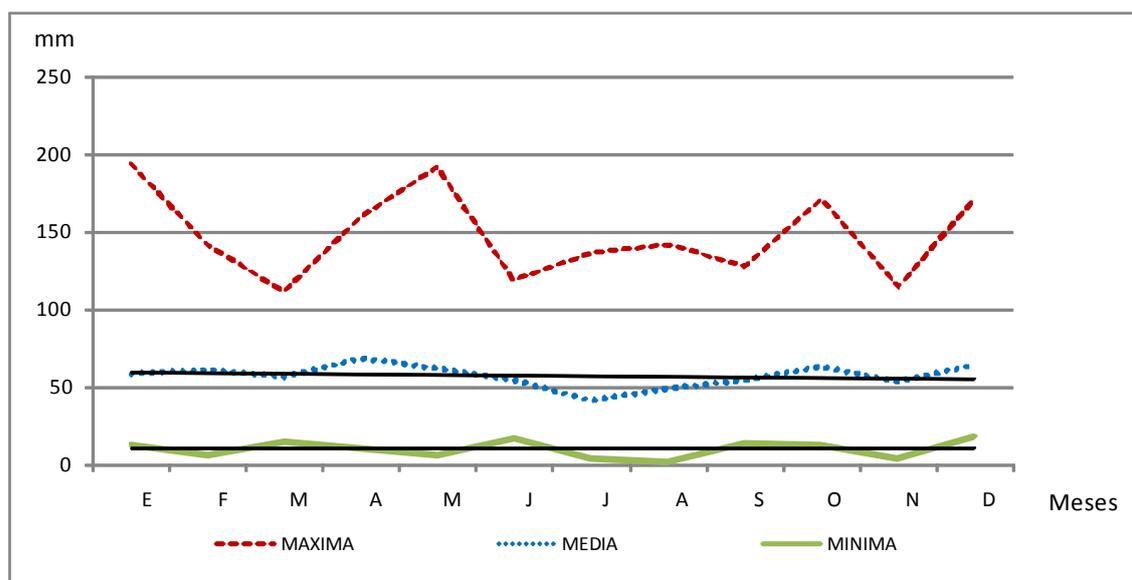


Gráfico 18: Distribución de las tormentas mensuales máximas en el período 1967-2006.

Las medias de las máximas tormentas se mantienen en un rango de los 50 mm y los 100 mm, sin tener en cuenta el mes de julio en la cual no se supero los 50 mm. Las tormentas mínimas no superan los 20 mm.

Exceptuando los meses de enero, abril, septiembre, octubre y noviembre, el resto de los meses máximas tormentas diarias se comportan de igual manera que las lluvias mensuales con lo que se podría decir que las tormentas individuales tienen una influencia en la precipitación mensual a lo largo de los años. Los meses restantes no reflejan lo que ocurren en la cantidad de lluvia mensual.

Precipitaciones máximas diarias mensuales de Cerro Azul

Observando de manera separada lo que ocurre con las precipitaciones diarias en cada mes en particular a lo largo de los años en estudio puede verse que los meses de febrero y diciembre son los que muestran una tendencia en aumento bien marcada de la cantidad de agua caída en cada tormenta, por otra parte los meses de mayo y octubre tienen una tendencia negativa en la cantidad de agua caída en las tormentas. El resto de los meses tienen una muy leve tendencia a disminuir. Se presenta a continuación, un detalle descriptivo mensual, con una representación gráfica individual mensual (Gráfico 19).

- El mes de enero se mantiene en un rango de los 50 mm y los 100 mm, presentando picos significativos en el año 1988 y en 1994 con un valor de 193,0 mm y de 161,0 mm respectivamente.
- Febrero tiene una tendencia en aumento bien marcada, en donde se observa un aumento de la cantidad de agua en cada tormenta a lo largo de los años en estudio. No manifiesta picos aislados sino que al pasar los años el rango de mayores precipitaciones

aumenta. Este comportamiento a lo largo de los años no se manifiesta en las lluvias mensuales donde ubica dentro del rango de las media de las máximas mensuales. Con lo que se deduce que la cantidad de agua caída en este ese se debe a un incremento en las tormenta individuales, y una disminución en las cantidad de tormentas.

- El mes de marzo tiene un comportamiento homogéneo en los años de estudio presentándose en un rango de lo 6 mm y los 100 mm., con excepción del año 1985, con un valor de 100,4 mm. Este comportamiento regular se puede observar en las precipitaciones mensuales, con lo que se ubicaría dentro del rango de la mínima de las precipitaciones.
- La tormentas del mes de abril se comporta regularmente no superando los 100 mm de agua caída, con excepción del año 1975 donde de registro una lluvia de 124,4 mm., por lo tanto el pico máximo de las precipitaciones mensuales se debe a un incremento de las tormenta en este mes., este incremento se manifiesta también en el aumento marcado de las precipitaciones mensuales a lo largo de los años de estudio te pude observan que el Número de tormentas mensuales se incrementan mientras que las cantidad de agua caída en cada tormenta va en disminución.
- Mayo se presenta como un mes que tiene dos períodos bien marcados, desde 1967 hasta 1984 las tormentas van incrementándose alcanzando una máxima de 191,1 en el año 1984, después de este ciclo, pasan bruscamente a tormentas menores a los 100 mm influyen de la manera significativa en la tendencia negativa del mes. Por otra parte mayo es un mes donde las máximas precipitaciones mensuales superan los 500 mm., esto se puede explicar por las máximas tormentas que se produjeron en el primer período. Se puede observar que tanto las precipitaciones mensuales como las máximas precipitaciones diarias del mes de mayo tienen un comportamiento similar. En el primer período el aumento de las precipitaciones mensuales se explicaría con el aumento de la cantidad de agua caída en casa tormenta, y cuando disminuyen las precipitaciones mensuales lo hace también la cantidad de agua caída en cada tormenta.
- En el mes de junio las tormentas se comporta de manera regular a lo largo de los años, superando los 100 mm., solo en tres ocasiones las cuales no son significativas estas son: 1972, 1986 y 2005 con valores de 118,6mm., 112,8mm. , 101,1mm.Se puede deducir que este mes es un no sufrió grandes cambios en su comportamiento a lo largo de los años. También los años de máxima tormenta 1972 y 1886 coinciden con los años en el que se registraron los picos de mayor precipitación anual.
- En julio se registra las tormentas máximas en un rango de los 4 mm y los 70,2 mm., sin tener en cuenta el valor alcanzo los 135,6 el año 1987 donde este mes coinciden con el pico máximo de las precipitación mensual y la máxima precipitación anual
- El mes de agosto es el que presenta una mayor amplitud pluvial, este se ubica en los 1,4 mm. y los 150 mm. Se observa una leve tendencia a la disminución de las cantidades de

agua caída en cada tormenta, y por el contrario los picos máximos aumentan al transcurrir los años el año 2002 el que tiene el máximo con un valor de 140,7 mm.

- En septiembre se registran las tormentas de manera uniforme dentro de un rango de 13,1 y los 50 mm., salvo en el año 1984 donde supero ampliamente los 50 mm alcanzado el valor de 126,6 mm.
- En octubre se observa al igual que septiembre un comportamiento regular a lo largo de los años de estudio., sin tener en cuenta el año 1975 donde presento una tormenta de 169,9 mm., y en 1996 con un valor de 101,6 mm., también puede observarse que en los últimos años se registra una disminución en la cantidad de agua caída en cada tormenta. Contradiciéndose con el comportamiento de las máximas precipitaciones mensuales que tiene una tendencia en aumento muy marcada. Con lo que se puede concluir que esta tendencia en aumento se explicaría con una mayor cantidad de tormentas producidas en el mes.de menor cantidad de agua caída.
- En el mes de noviembre se registran tormentas en un rango de los 3,2 mm. y los 100 mm., presentándose de manera uniforme. Este tiene una tendencia negativa mínima. Pero se puede ver claramente como después del año de mayor tormenta, 1982 con un valor de 113, 7 y del pico menor ocurrido en el año1985 con un valor de 3,2 mm., las tormentas presentan un aumento de la cantidad de agua caída. Este aumento se refleja en el comportamiento de las precipitaciones mensuales, responden al aumento en las cantidades de agua de las tormentas individuales.
- Diciembre es el mes donde las tormentas tienen un aumento de la cantidad de agua caída, provocando una tendencia positiva muy importante. Esta se encuentra en el rango de los 10 mm. y los 100 mm., sin tener en cuenta los años los años 1999, 2002, 2003 y 2005 donde se supero los 100mm., teniendo el valor máximo de 163,3 en el2003. Se puede observar que después de 1997 donde se registro una lluvia de 74 mm., se produjeron las tormentas que superaron los 150 mm. que contribuyen al aumento de las precipitaciones mensuales

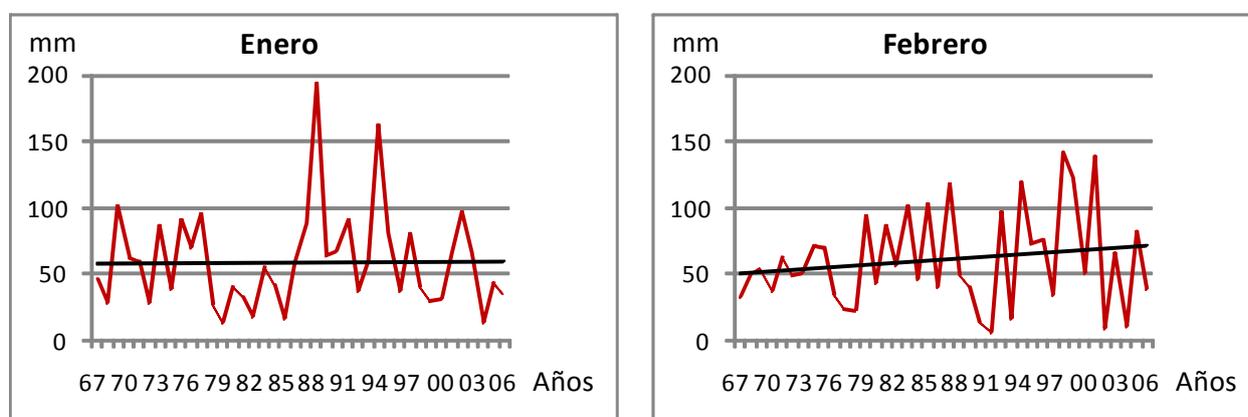


Gráfico 19: Precipitaciones máximas diarias mensuales en el período 1967-2006.

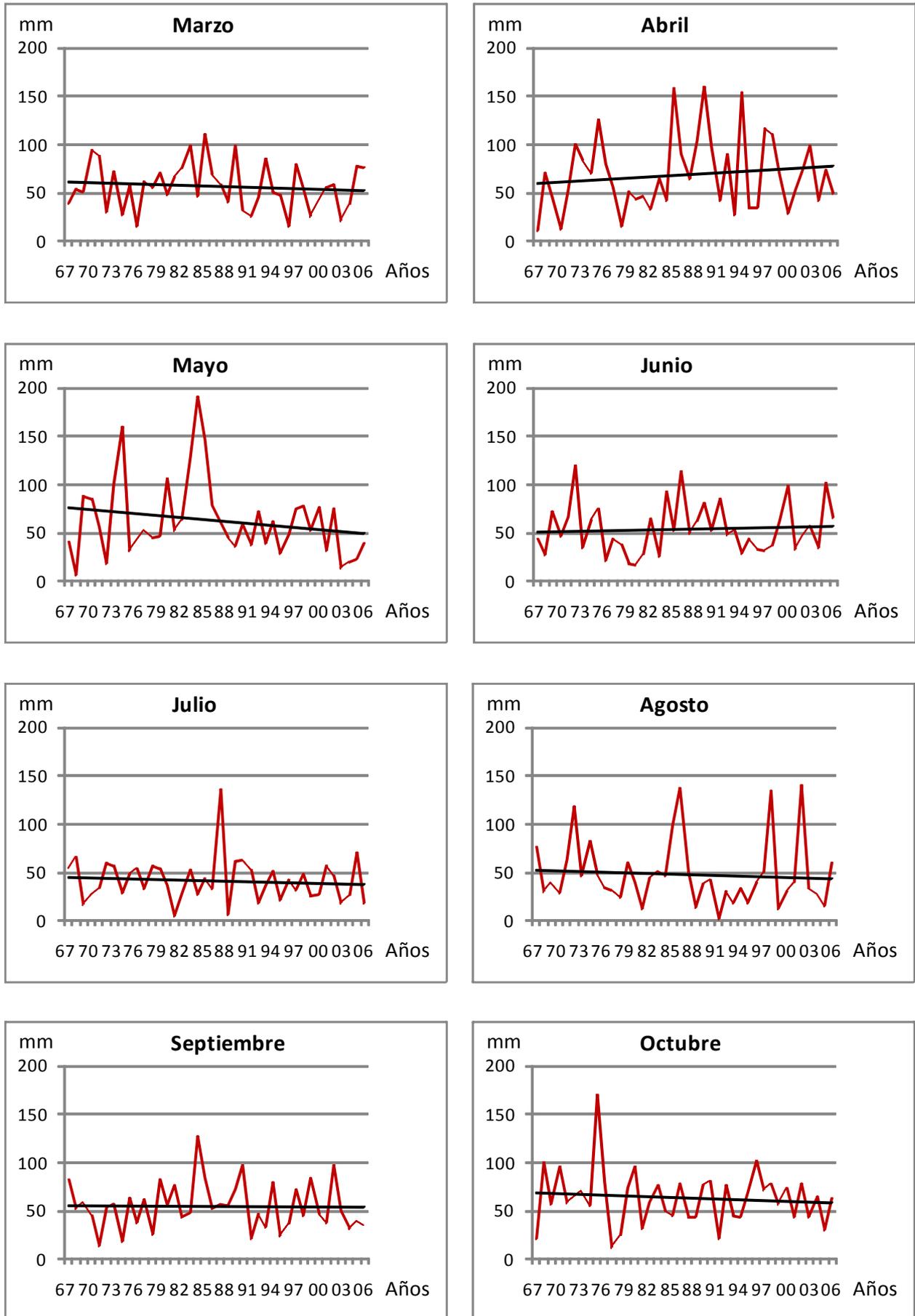


Gráfico 19: Precipitaciones máximas diarias mensuales en el período 1967- 2006. Continuación.

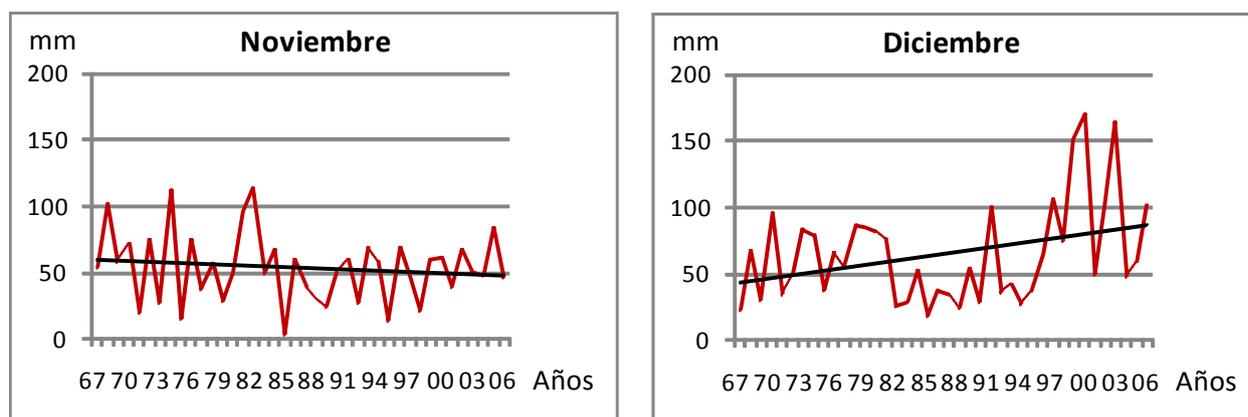


Gráfico 19: Precipitaciones máximas diarias mensuales en el período 2967- 2006. Continuación.

1.2 Morfología de la cuenca

Para explicar la morfología de la cuenca se obtuvieron los parámetros definidos según Bustamante (1984) adaptados a la Cuenca del Arroyo Itacaruaré. Para ello se definió el desnivel y la longitud de cauce particular para cada curso de agua principal (Tabla 7).

Arroyos principales	Desnivel (m)	Longitud (km)
Arroyo Itacaruaré	175 metros	31,06 km
Arroyo del Medio	175 metros	22,99 km
Arroyo del 25	200 metros	20,80 km

Tabla 7: Descripción general de los Arroyos principales de la Cuenca del Arroyo Itacaruaré.

1.1.1 Parámetros de relieve

Los parámetros del relieve que tienen influencia sobre la Cuenca del Arroyo Itacaruaré para cada subcuenca se presentan en la tabla 8

La influencia del relieve sobre la cuenca del arroyo Itacaruaré es evidente. A mayor pendiente corresponderá una menor duración de concentración de las aguas de escorrentía en la red de drenaje y afluentes al curso principal. Los parámetros desarrollados para esta tesis son los siguientes:

a. Área (A)

La cuenca en estudio posee una superficie total de 353,03 km², las que fueron delimitadas por las divisorias de aguas que encierran al arroyo y sus afluentes desde su nacimiento. Es considerada como el parámetro físico básico que define a una cuenca, siendo determinante de la escala de varios fenómenos hidrológicos tales como, el volumen de agua que ingresa por precipitación, la magnitud de los caudales, etc. En la tabla 8 se presentan los resultados del área para cada subcuenca siendo la subcuenca de mayor tamaño la 4, con un valor de 103.73 km², la de menor tamaño la 9, con 4,18 km².

b. Perímetro (P)

El perímetro es la longitud del límite exterior de la cuenca y depende de la superficie y la forma de la cuenca.

El perímetro por subcuenca se presenta en la tabla 8, siendo el mismo la medición en longitud de la línea envolvente del área.

La subcuenca 1 es la que posee el mayor perímetro, 61,87 km y la subcuenca 9 la de menor perímetro presentando un valor de 11,00 km.

La cuenca del Arroyo Itacaruaré posee un perímetro total de 93,31 km.

c. Longitud axial (La)

Para la cuenca y cada una de las subcuencas se definió como la distancia existente entre la desembocadura y el punto más lejano de la cuenca (Tabla 8)

La cuenca del Arroyo Itacaruaré posee una longitud axial de 23,89 km (Tabla 8)

La subcuenca 1 es la que mayor longitud axial presenta siendo de 15,38 km y la subcuenca 9 la menor longitud con un valor de 2,30 km.

d. Ancho promedio (AP)

En la tabla 8 se presenta el AP, resultado del cociente entre el área de la subcuenca y su longitud axial.

La subcuenca que presentó un mayor ancho promedio fue la 4, presentando un valor de 8,09 km y la de menor valor la subcuenca 8 con un valor de 1,25 km.

Teniendo la Cuenca del área de estudio un ancho promedio de 14,78 km.

e. Altura media

Se calcula como el coeficiente entre el volumen de la cuenca (superficie comprendida entre la curva hipsométrica y los ejes coordenados) y su superficie

La altura media es tanto mayor cuanto más se eleva el relieve por encima de la altitud mínima y tanto menor cuanto menor es la variación de altitud presente el relieve.

Subcuencas	Área (km ²)	Perímetro (km)	Longitud Axial (km)	Ancho Promedio (km)	Altura Media (m)
1	81,79	61,87	15,38	5,32	219,63
2	95,89	60,03	14,19	6,76	240,61
3	3,99	11,88	2,20	1,81	135,51
4	103,73	57,07	13,16	7,88	211,47
5	23,29	28,08	6,81	3,42	176,2
6	11,75	21,44	3,11	3,78	150,78
7	18,86	26,04	7,68	2,46	187,37
8	9,55	17,16	3,00	3,19	146,31
9	4,18	11,00	2,30	1,82	142,31
Cuenca	353,03	93,31	23,89	14,78	212,54

Tabla 8: Parámetros de Relieve para la Cuenca del Arroyo Itacaruaré y sus subcuencas.

f. Curva hipsométrica

Se realizaron los gráficos de las curvas hipsométricas de cada subcuenca para caracterizar su relieve (Gráfico 20).

Las subcuencas 1 y 4 tienen un fuerte pendiente en los primero 10% de la parte alta comenzando con 450 msnm y llegando al 400 msnm, entre el 10% y el 90% presenta un pendiente contante con un desnivel de 150 m, después del 90% de se observa un fuerte pendiente que tiene como cota mayor 250 msnm y una cota menor de 200 msnm.

La subcuenca 2 presenta un nivel de 450 msnm a 400 msnm hasta el 20% de su cabecera, luego su pendiente se suaviza hasta el 50 % de la subcuenca donde cambia a una pendiente mas fuerte hasta el 90% , el ultimo 10% de la subcuenca una pendiente más marcada aun con un nivel del 250 msnm a 200 msnm.

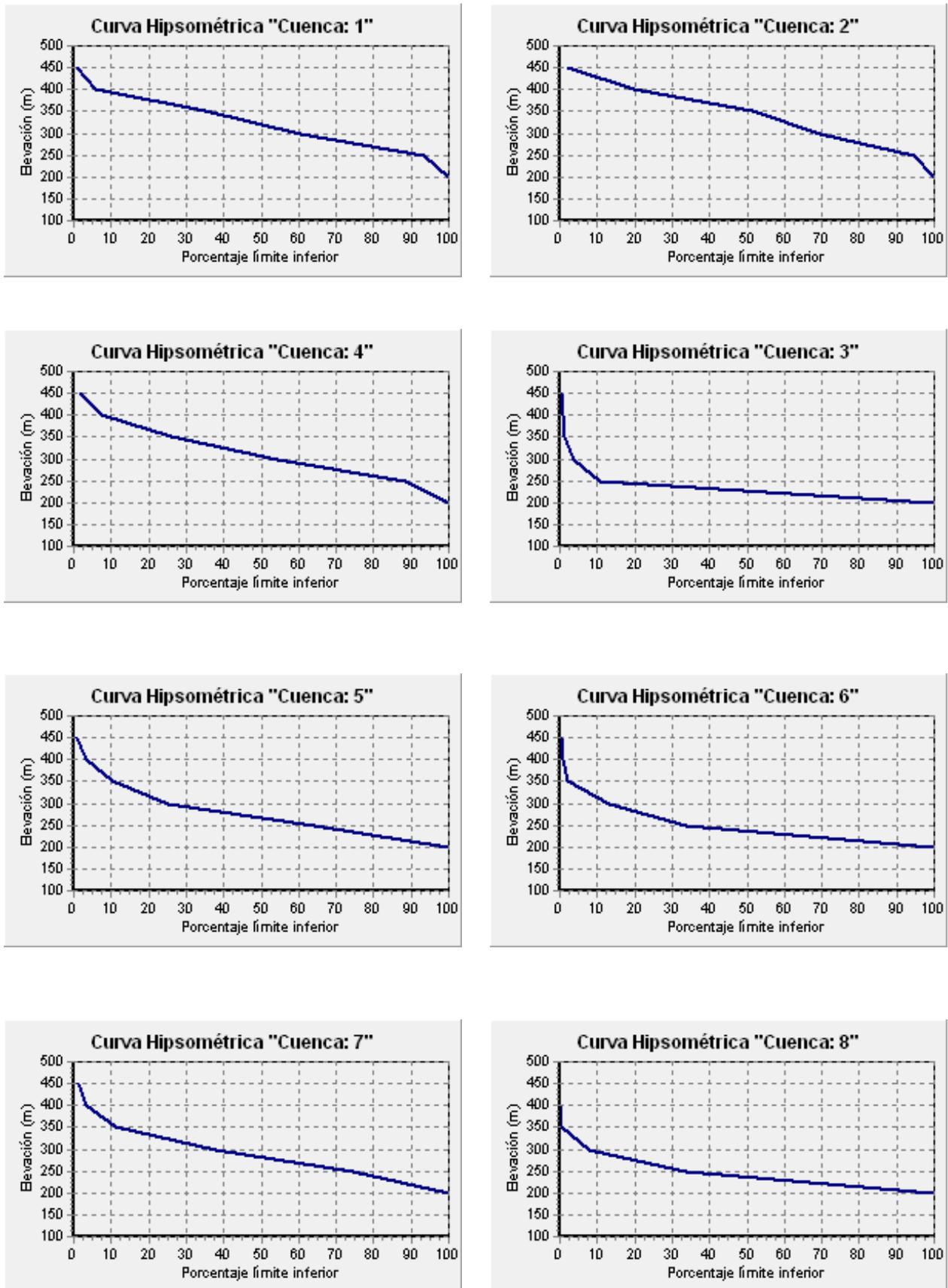


Gráfico 20: Curvas hipsométricas de las subcuencas de la Cuenca del Arroyo Itacaruaré.

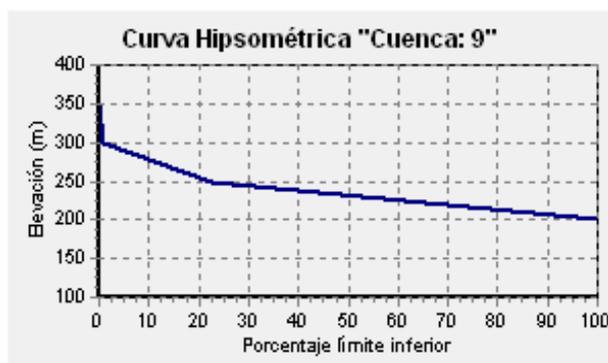


Gráfico 20: Curvas hipsométricas de las subcuencas de la Cuenca del Arroyo Itacaruaré. Continuación.

La subcuenca 3 presenta una pendiente muy abrupta en el origen de la subcuenca presentando un nivel que desciende desde los 450 msnm hasta los 250 msnm hasta el 10% inicial de la subcuenca. Luego su pendiente se suaviza hasta el final de la subcuenca llegando a un nivel de 200 msnm.

Las subcuencas 5 y 7 se caracterizan por tienen un desnivel de 50 m, desde los 450 msnm a 300 msnm hasta el 30 % de la subcuenca desde su origen, luego presenta una pendiente más suavizada llegando a los 200 msnm al final de la subcuenca.

La subcuenca 6 tiene un pendiente marcada hasta el 30% cuyo nivel desde los 450 msnm a los 250 msnm, donde su pendiente se suaviza llegando a los 200 msnm al final de la subcuenca.

La subcuenca 8 presenta un fuerte pendiente en el 10% inicial de la subcuenca, presentando cotas entre 350 msnm a 300 msnm, del 10% al 40% su pendiente se suaviza con un desnivel de 50 m, y suavizándose aun mas hasta el final de la subcuenca con un valor de 200 msnm.

La subcuenca 9 presenta dos pendientes, una inicial más fuerte hasta el 20% y otra más leve hasta el final de la subcuenca.

1.1.2 Parámetro de forma

La forma de la cuenca influye sobre los escurrimientos y sobre la marcha del hidrograma resultante de una precipitación así en una cuenca de forma alargada de agua discurre en general por un solo cauce principal, mientras que en otra de forma ovalada los escurrimientos recorren cauces secundarios hasta llegar a uno principal, por lo que la duración del escurrimiento es superior.

Los índices más empleados para representar esta características son:

a. Coeficiente de Gravelius. Índice de compacidad (C_g)

El coeficiente de compacidad de Gravelius, por cuenca y sus subcuenca se presenta en la tabla 9. El valor que toma esta expresión es siempre mayor que la unidad y crece con la irregularidad de la forma de la cuenca, estableciéndose la clasificación según la tabla 1

El valor de C_g indica que la cuenca presenta con una forma irregular u oblonga y al relacionarlo con su tiempo de concentración se puede llegar a la conclusión que el agua dentro de la cuenca escurre por cauces secundarios hasta llegar a uno principal donde su tiempo de concentración aumenta considerablemente. Esta forma significa que retarda la acumulación de las aguas al paso del río por su punto de desagüe. Este índice aumenta con la irregularidad de la forma de la cuenca. (Henaos, 1988; López Cadenas de Llano, 1998).

Subcuencas	Coeficiente de Gravelius
1	1,92
2	1,72
3	1,66
4	1,57
5	1,65
6	1,77
7	1,68
8	1,55
9	1,51
Cuenca	1,76

Tabla 9: Clasificación del coeficiente de Gravelius por subcuenca

Las subcuencas presentan C_g entre los valores 1,50-1,75, con lo cual su forma serian oblongas, exceptuando las subcuencas 1 y 6 que tienen valores mayores a los 1,75 con lo cual indica que su forma es irregular u oblonga (Tabla 9).

b. Rectángulo equivalente

A nivel de subcuencas, se estableció valor de L e I, expresado en la tabla 10.

c. Factor de forma (IF)

EL IF de la Cuenca del Arroyo Itacaruaré presenta un valor total de 0,62 con lo cual certifica el coeficiente de Gravelius indicando que la cuenca presenta forma alargada (Tabla 10).

Los IF de las subcuencas perimetrales (1, 2, 4, 5 y 7) se caracteriza por poseer forma alargada. Las subcuencas 3 y 9 presentan forma redondeada; las 6 y 8 una forma oval redonda (Tabla 10).

Subcuencas	Rectángulo equivalente (L)(m)	Rectángulo equivalente (l)(m)	Factor de forma (IF)
1	28015,55	2919,45	0,35
2	26380,06	3634,94	0,48
3	5167,93	772,07	0,82
4	24259,07	4275,93	0,60
5	12118,08	1921,92	0,50
6	9480,63	1239,37	1,21
7	11359,75	1660,25	0,32
8	7265,58	1314,42	1,06
9	4589,16	910,84	0,79
Cuenca	36944,46	9555,69	0,62

Tabla 10: Valores de los parámetros de forma de la Cuenca del Arroyo Itacaruaré y sus subcuencas.

1.1.3 Parámetros de relieve en relación con la erosión

Es evidente el carácter determinante que toma el relieve en el fenómeno erosivo. Los índices más utilizados que destacan esta relación son:

a. Factor topográfico

El factor topográfico definido a nivel de cuenca y subcuencas se presenta en la tabla 11.

Para determinar este factor de la cuenca y sus subcuencas se utilizó el mapa de curvas de nivel (escala 1:25.000, equidistancia de 25 metros) y su M.D.T., obteniendo como resultado,

según la clasificación de López Cadenas de Llano (Tabla 2), un relieve accidentado para la Cuenca del Arroyo Itacaruaré.

Las subcuencas 3, 6, 8 y 9 se caracterizan por un relieve mediano y las restantes un relieve accidentado. Este factor tiene una gran importancia porque, indirectamente, a través de la velocidad del flujo de agua, indica el tiempo de respuesta de la cuenca.

Subcuencas	Factor topográfico
1	15,40
2	15,49
3	7,15
4	17,28
5	13,29
6	8,46
7	17,46
8	9,48
9	8,35
Cuenca	15,39

Tabla 11: Valores de los parámetros de relieve en relación con la erosión de la Cuenca el área de estudio y sus subcuencas.

1.1.4 Parámetros relativos a la red hidrográfica

Se llama red hidrográfica al drenaje natural, permanente o temporal, por el que fluyen las aguas de los escurrimientos superficiales.

La red hidrográfica superficial se analizó a través de una serie de clasificaciones y parámetros.

a. Densidad de drenaje (D)

La densidad de drenaje de la cuenca y sus subcuencas se presenta en la tabla 12.

El valor de la cuenca de estudio evidencia, una densidad de drenaje baja en la cuenca de la cabecera por influencia de materiales duros y resistentes, representando las subcuencas 1, 2 y 4. Las subcuencas tienen una densidad de drenaje baja como la 3 y 5 es baja y se debe por

poseer materiales permeables por sucesivas deposiciones. Debido a la erosión fluvial las subcuencas 8 y 9 también presentan densidad baja. En el caso de la subcuenca 7 presenta una elevada densidad de drenaje debido a las características particulares de sus cursos de drenaje, como ser su longitud y distribución en el terreno.

La densidad de drenaje se relaciona con el tipo de material geológico y la susceptibilidad a la erosión.

b. Pendiente media del cauce (J)

La pendiente media del cauce de la cuenca y a nivel de subcuencas, se expresan en la tabla 12. La J de la Cuenca del Arroyo Itacaruaré es de 1,07 %.

c. Alejamiento medio (a)

El alejamiento medio de cada subcuenca se expresa en la tabla 12.

Subcuencas	Densidad del drenaje (%)	Pendiente media del cauce (%)	Alejamiento medio (%)
1	1,04	1,14	9,41
2	1,08	1,09	10,67
3	0,65	3,36	1,49
4	1,07	1,10	10,91
5	0,55	2,17	2,97
6	1,21	2,20	3,75
7	1,82	2,66	7,94
8	1,09	1,76	3,38
9	1,15	1,56	2,36
Cuenca	1,07	0,85	19,84

Tabla 12: Valores de los parámetros relativos a la red hidrográfica de la Cuenca en estudio y de sus subcuencas.

2. Generación del Modelo Cartográfico

2.1. Mapa topográfico:

Este mapa proporciona la distribución de las curvas de nivel que describen el relieve de la Cuenca del Arroyo Itacaruaré. La cota máxima que presenta la cuenca es de 355 metros sobre el nivel del mar siendo la mínima de 120 metros. En la figura 5 se ven representadas por color verde oscuro las cotas máximas y por color negro las mínimas. Cabe mencionar que en dicha cartografía se presenta también el límite de la cuenca.

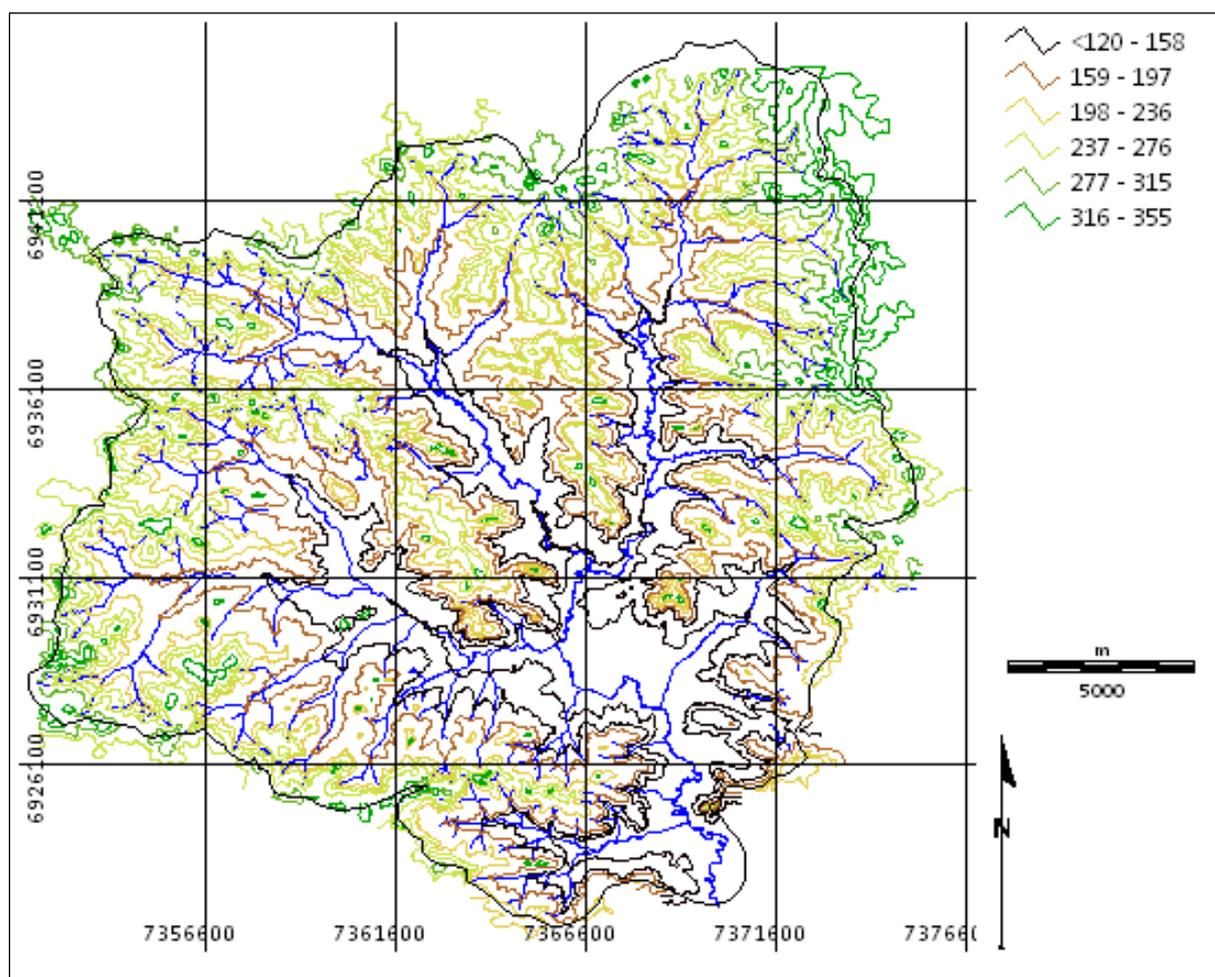


Figura 5: Mapa topográfico de la Cuenca del Arroyo Itacaruaré.

2.2. Mapa red de drenaje:

En el siguiente mapa se observa la red de drenaje del área de estudio (Figura 6). Esta cuenca cuenta con tres arroyos importantes, el arroyo Itacaruaré, arroyo del medio y arroyo del 25. En el desarrollo del estudio morfométrico se realizó una descripción de las características principales de la red de drenaje.

Desde la cabecera de la Cuenca del Arroyo Itacaruaré en sus primeros 5 a 10 km, su pelo de agua está directamente influenciado por el gran emisario; luego comienza a entrar en un cañón zigzageante, rocoso, estrecho, con laderas cubiertas de monte en galería. En la zona de formación del cauce principal, aproximadamente subcuenca 3, comienzan los tramos con cursos más cortos sinuosos hasta la subcuenca 9, que es la que presenta mayor sinuosidad en relación a la misma.

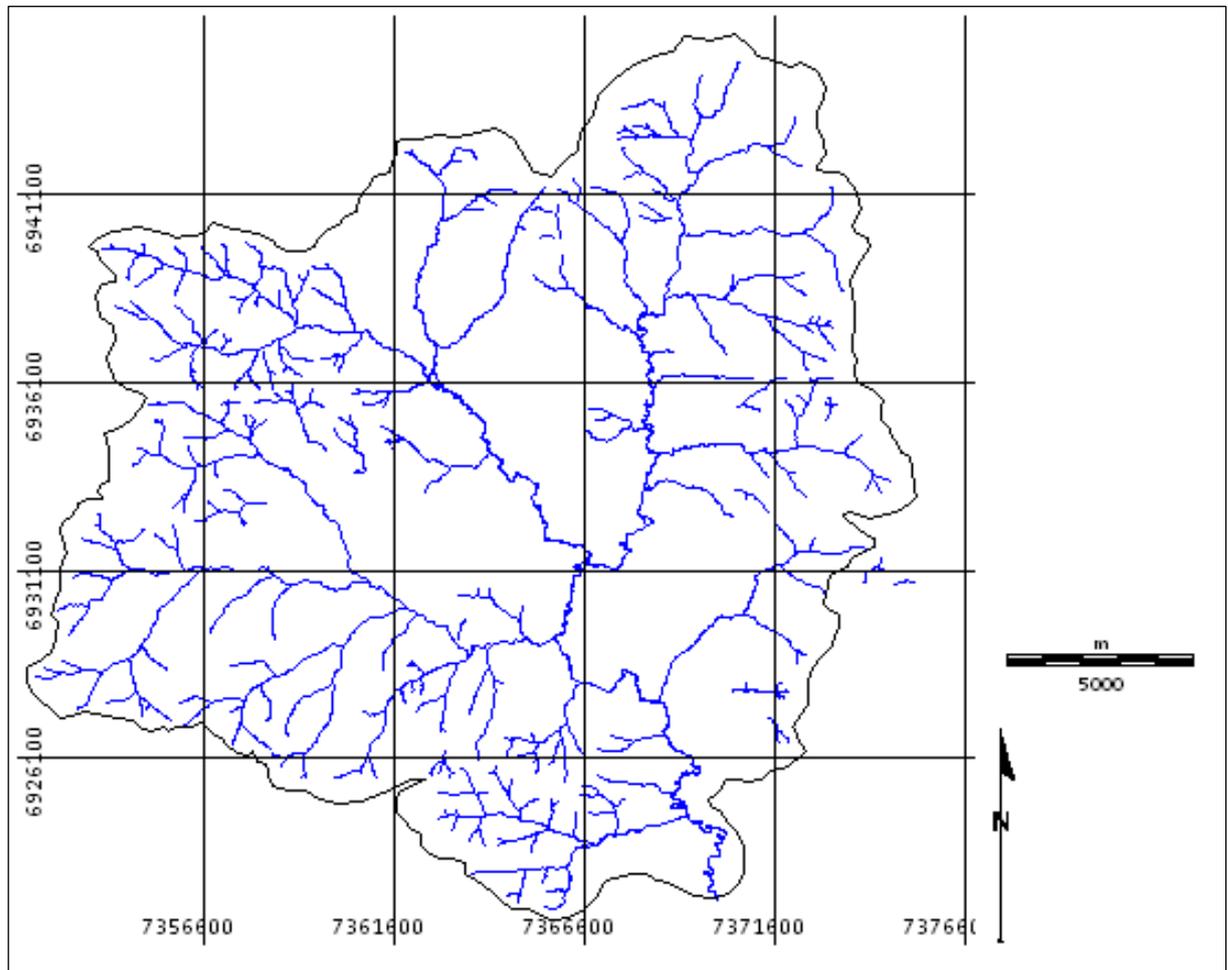


Figura 6: Mapa de red de drenaje del área en estudio.

2.3. Delimitación de la subcuencas:

Para obtener un mayor nivel de detalle y uniformidad de los parámetros característicos de la cuenca se procedió a la división de esta al nivel de subcuenca. Las cuales fueron identificadas 9 subcuencas figura 7. Se le asignó a cada una un color diferente que se detalla en la leyenda del mapa correspondiente. En la tabla 8, 9, 10, 11 y 12 se presentan las características morfométricas de cada una de las subcuencas.

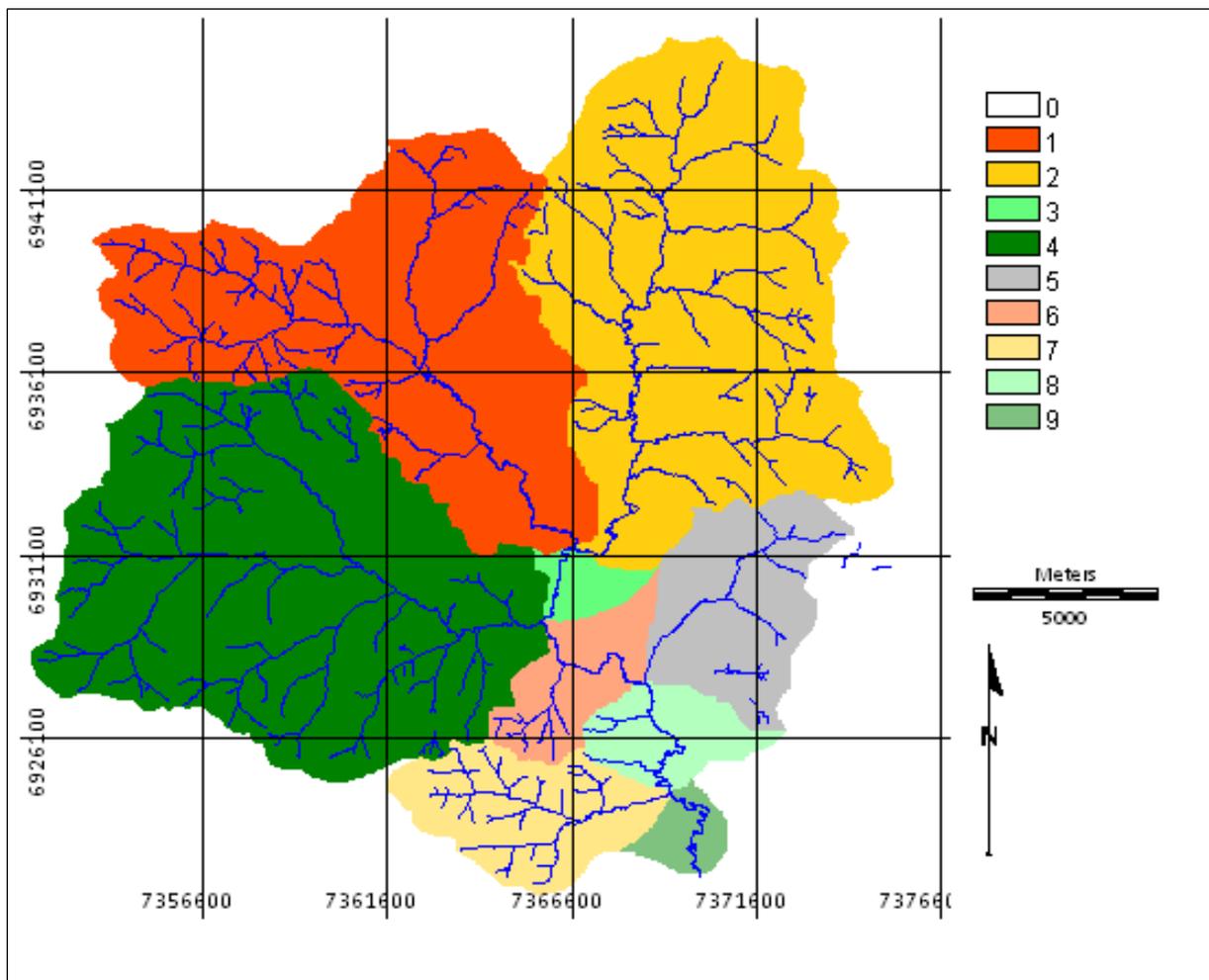


Figura 7: Mapa del límite de la Cuenca con sus subcuencas del Arroyo Itacaruaré.

2.4. Modelo digital del terreno:

El M.D.T. refleja la cota altimétrica de cada píxel de la cuenca (Figura 8). Este se generó a partir de la rasterización del mapa topográfico (Figura 5).

La interpretación altimétrica se realizó a través de la paleta de colores de la leyenda del mapa, correspondiendo el azul a las cotas más altas de la cuenca, del orden de los 355 metros sobre el nivel del mar y la de menor cota de color negro correspondiendo a niveles menores a los 123 metros sobre el nivel del mar. En este mapa también puede visualizarse el sistema de drenaje de la cuenca en estudio. Como ejemplo se identifican las zonas más bajas de la cuenca presenta color naranja con una altura de 190 metros sobre el nivel del mar, y de color verde las cotas de aproximadamente 282 metros sobre el nivel del mar.

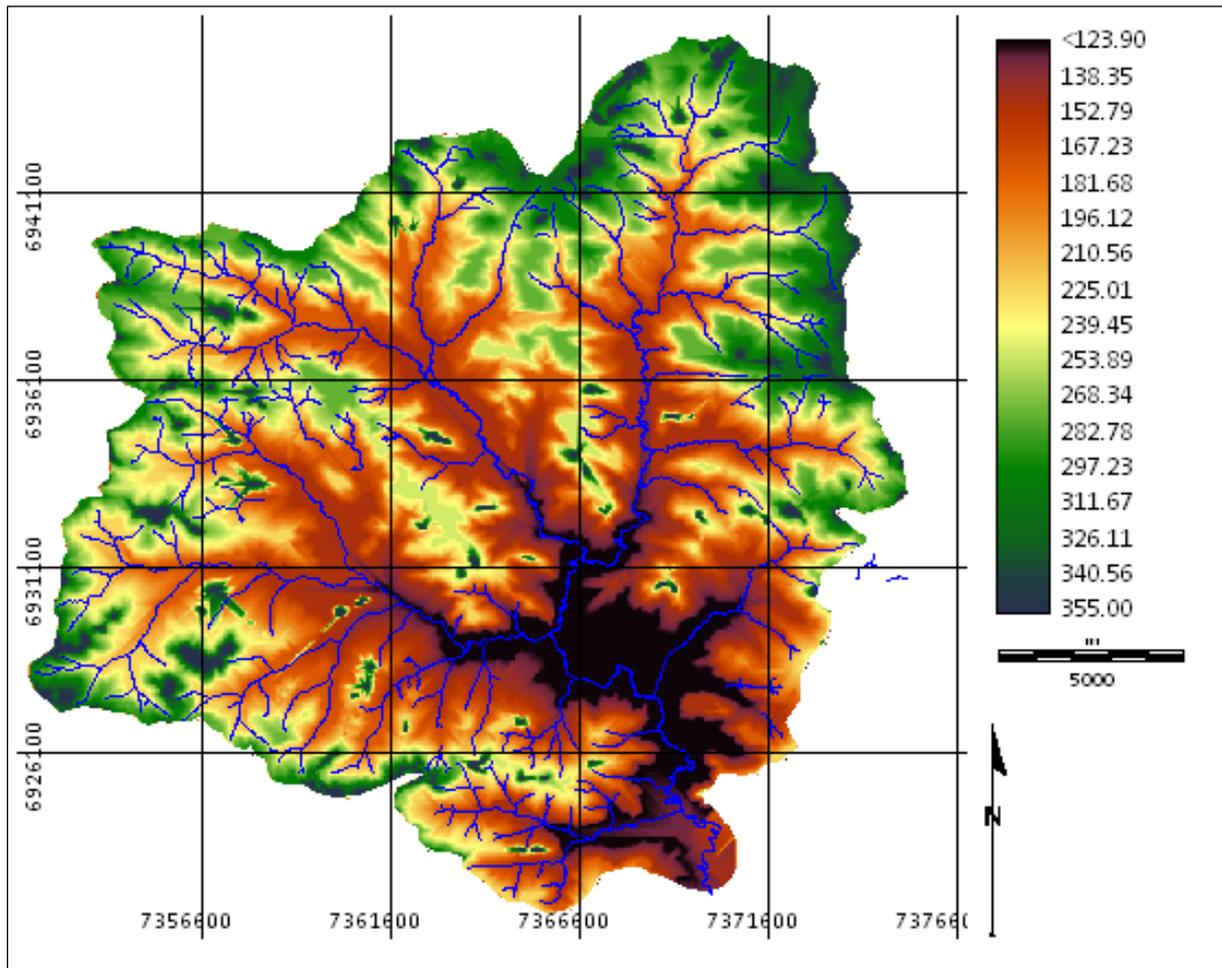


Figura 8: Modelo Digital del Terreno del área de estudio (cotas en metros sobre el nivel del mar).

2.4. Mapa de rangos de pendiente:

Se zonificó el área en estudio según intervalos de clases de pendiente según López Cadenas de Llano (1998) a partir del mapa topográfico (Figura 5). De esta manera se obtuvo el mapa de rango de pendiente de la Cuenca del Arroyo Itacaruaré (Figura 9). En la tabla 13 se presenta la superficie ocupada por cada categoría de pendiente.

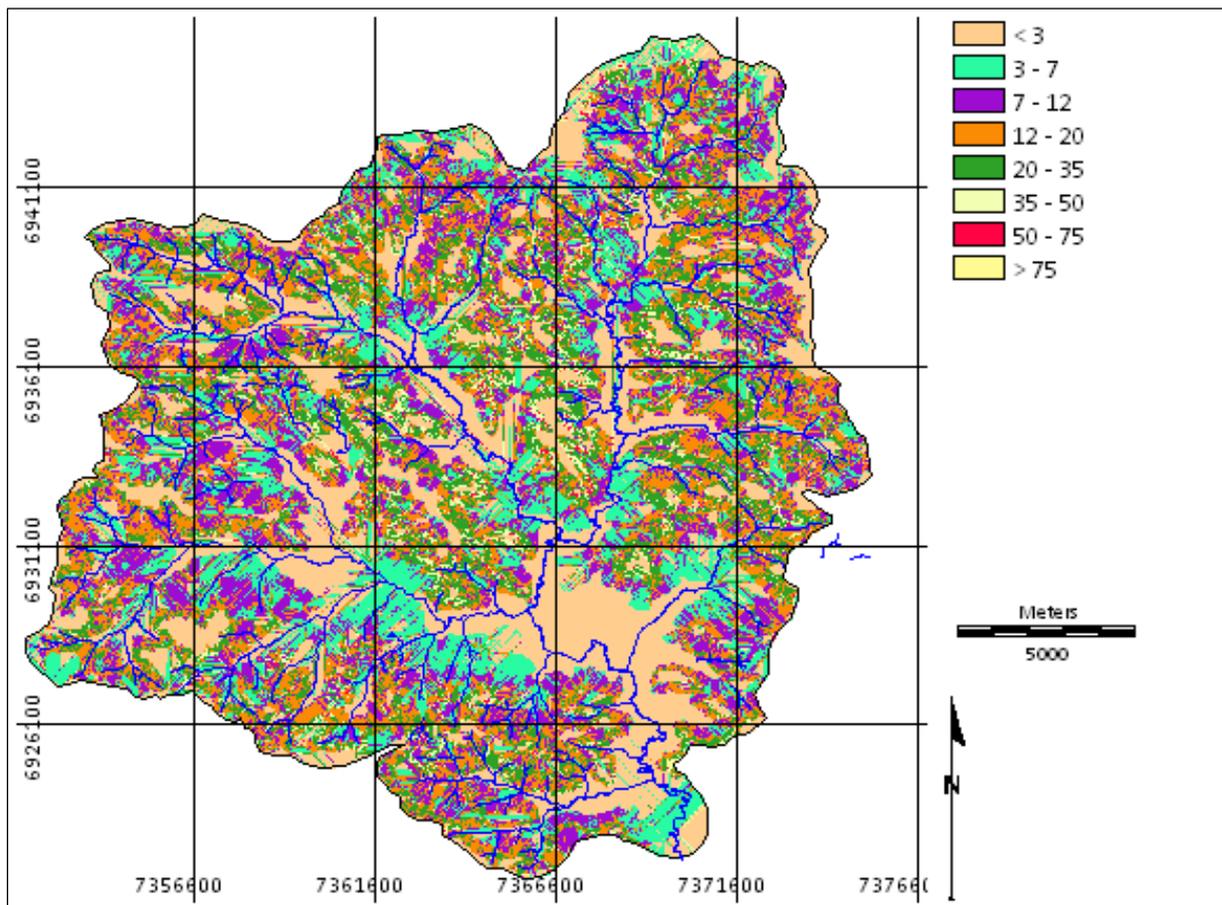


Figura 9: Mapa de rangos de pendientes de la Cuenca del Arroyo Itacaruaré.

A partir de la interpretación de la figura 9 se realizó una clasificación de las pendientes medias para la Cuenca del Arroyo Itacaruaré, según su tipo de relieve expresado en la tabla 13.

Pendientes medias (%)	Tipo de relieve	Superficie ocupada (km ²)	Superficie ocupada (%)
< - 3	Plano	92,42	26,18
3 - 7	Suave	55,48	15,79
7 - 12	Mediano	65,45	18,54
12 - 20	Accidentado	70,75	20,04
20 - 35	Fuerte	52,70	14,93
35 - 50	Muy fuerte	11,94,	3,38
50 - 75	Escarpado	2,99	0,85
> - 75	Muy escarpado	1,01	0,29

Tabla 13: Superficie ocupada según categoría de pendiente medias.

La cuenca se caracteriza por tener un relieve plano y suave que ocupa un 41,97 % de la cuenca, estos tipos de relieve se presentan a las riberas de los arroyos.

La iniciación de la erosión laminar por arrastre de los elementos más finos aparece para pendientes entre 2 % y 3 % para un suelo con laboreo (Mintegui Aguirre y López Unzú; 1990). Con lo cual el área de estudio de la cuenca posee un 73,82 % de la superficie con un susceptible riesgo de sufrir erosión hídrica superficial ante el laboreo.

Cabe mencionar que el 60,51 % de la cuenca presenta pendientes con potencial uso agropecuario, con una recomendada implementación de medidas conservacionistas sobre el rango de pendiente del 7 %-12 %.

El rango de pendiente de los 12 % - 35 %, ocupa una superficie de 34,97 % del total de la cuenca, implicando además zonas de alto riesgo de erosión hídrica. En estas pendientes no son aptas para cultivos, si para pastura o bosques.

En el caso de pendientes mayores a 35 % solo se encuentra representando solo el 4,52 % de la cuenca, en donde es alto el riesgo de erosión hídrica, no debería destinarse a explotación productiva alguna, ni agrícola ni forestal. Se debe mantener la vegetación forestal para la protección contra la erosión hídrica.

2.5. Mapa de exposición de laderas:

La clasificación de la cuenca según su exposición de laderas se efectuó en rangos de orientación con respecto al norte cuadrícula de la figura 10 definida por la exposición de cada una de las laderas con respecto ocho categoría de 45° cada una. (Tabla 14)

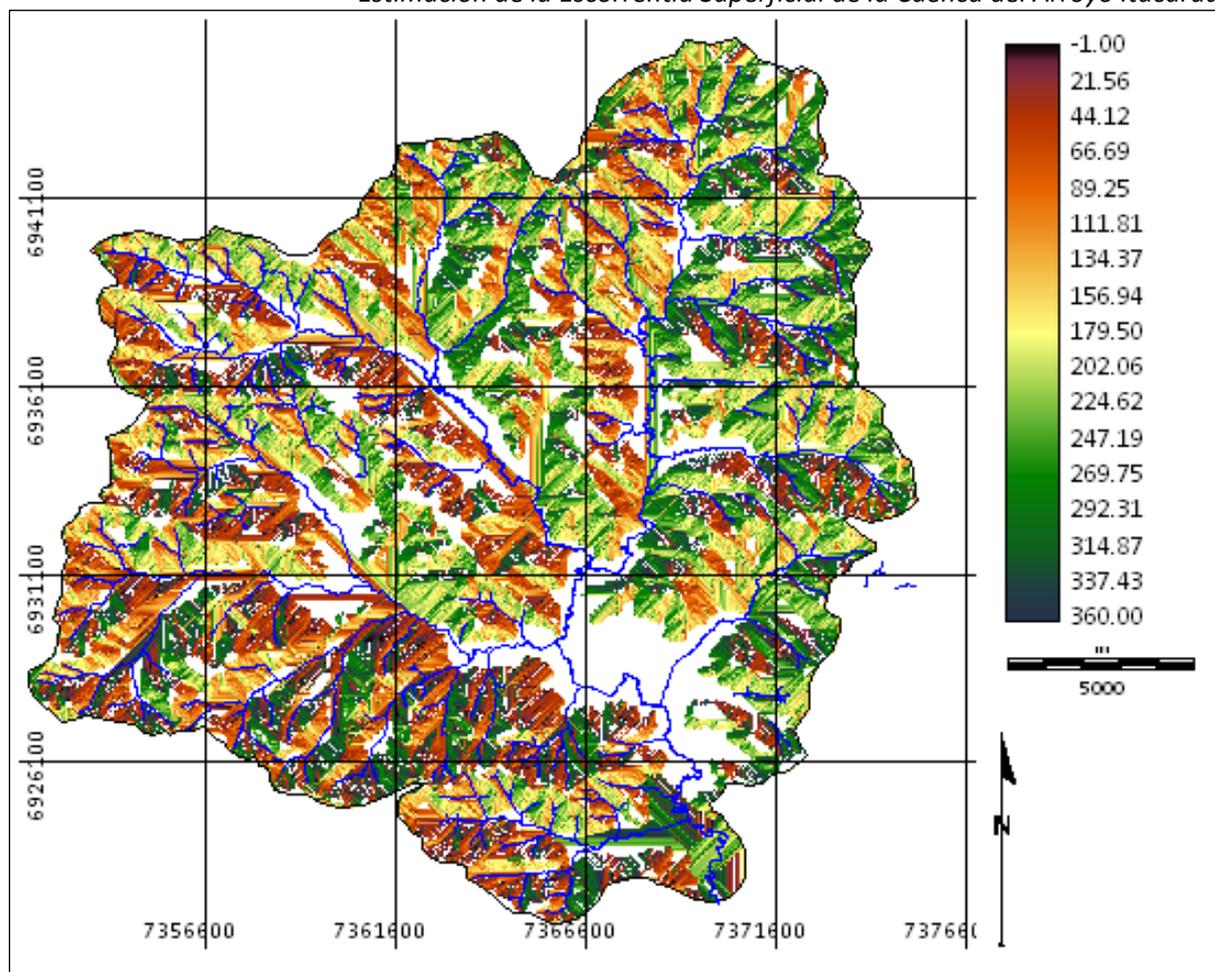


Figura 10: Mapa de orientación de laderas en grados con respecto al Norte cuadrícula de la Cuenca del Arroyo Itacaruaré.

En la tabla 14 se refleja la clasificación en rangos de orientación con respecto al norte cuadrícula quedando representado el mapa de exposición de laderas en la figura 11.

Categorías	Rangos de orientación con respecto al N cuadrícula.	Exposición de laderas
1	0° - 45°	NNE
2	45° - 90°	NE
3	90° - 135°	SE
4	135° - 180°	SSE
5	180° - 225°	SSW
6	225° - 270°	SW
7	270° - 315°	NW
8	315°- 0°	NNW

Tabla 14: Exposición de las laderas y su rangos de en grados de la Cuenca del Arroyo Itacaruaré.

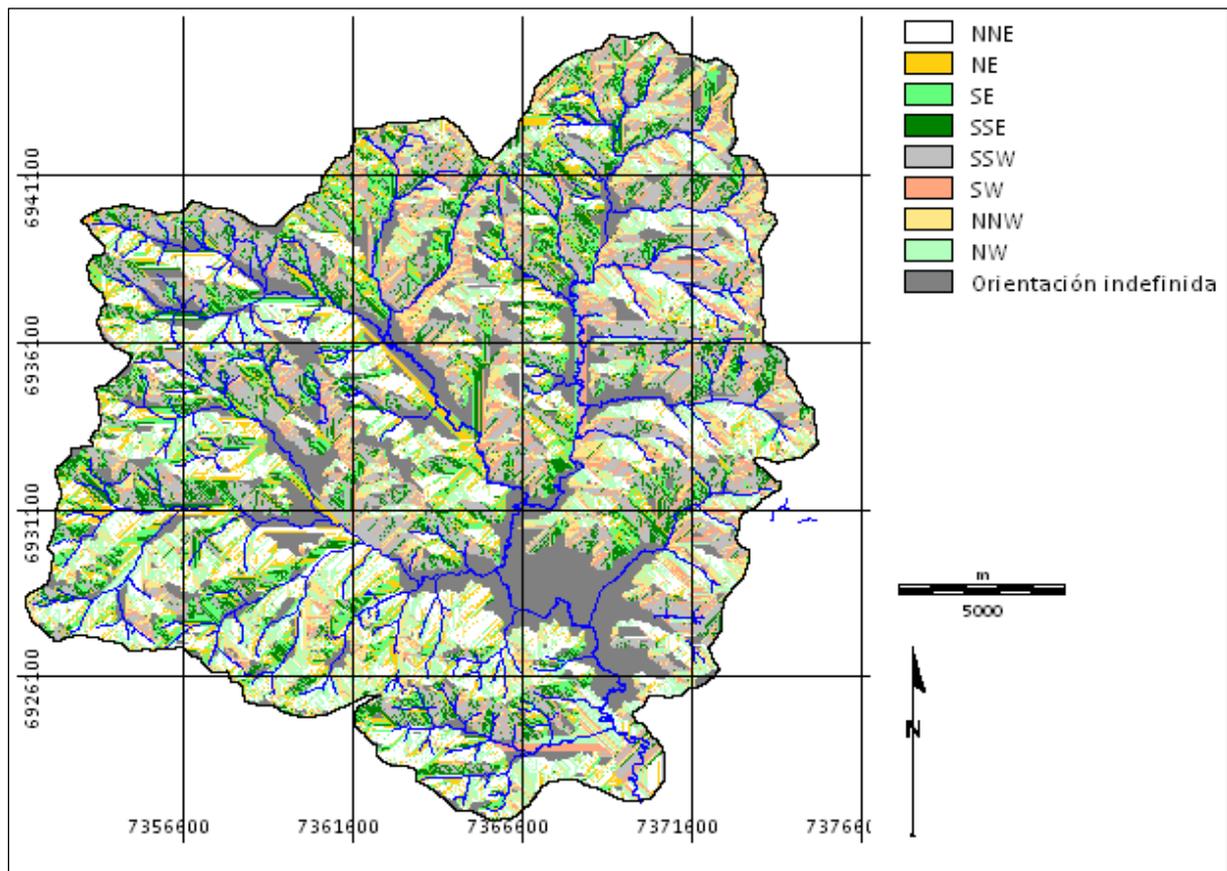


Figura 11: Mapa de rangos de exposición de laderas de la Cuenca del Arroyo Itacaruaré.

2.6. Mapa de iluminación de laderas:

Se generó a partir del módulo de operación de contexto del SIG, con el comando Surface, que calcula las pendientes y orientaciones, y compone una imagen de iluminación del relieve a partir del D.T.M.

En el mapa de iluminación de laderas se corrobora el mapa de orientación de laderas, en los cuales los valores expresan la rugosidad del terreno a través de la incidencia de los rayos solares sobre el suelo (Figura 12).

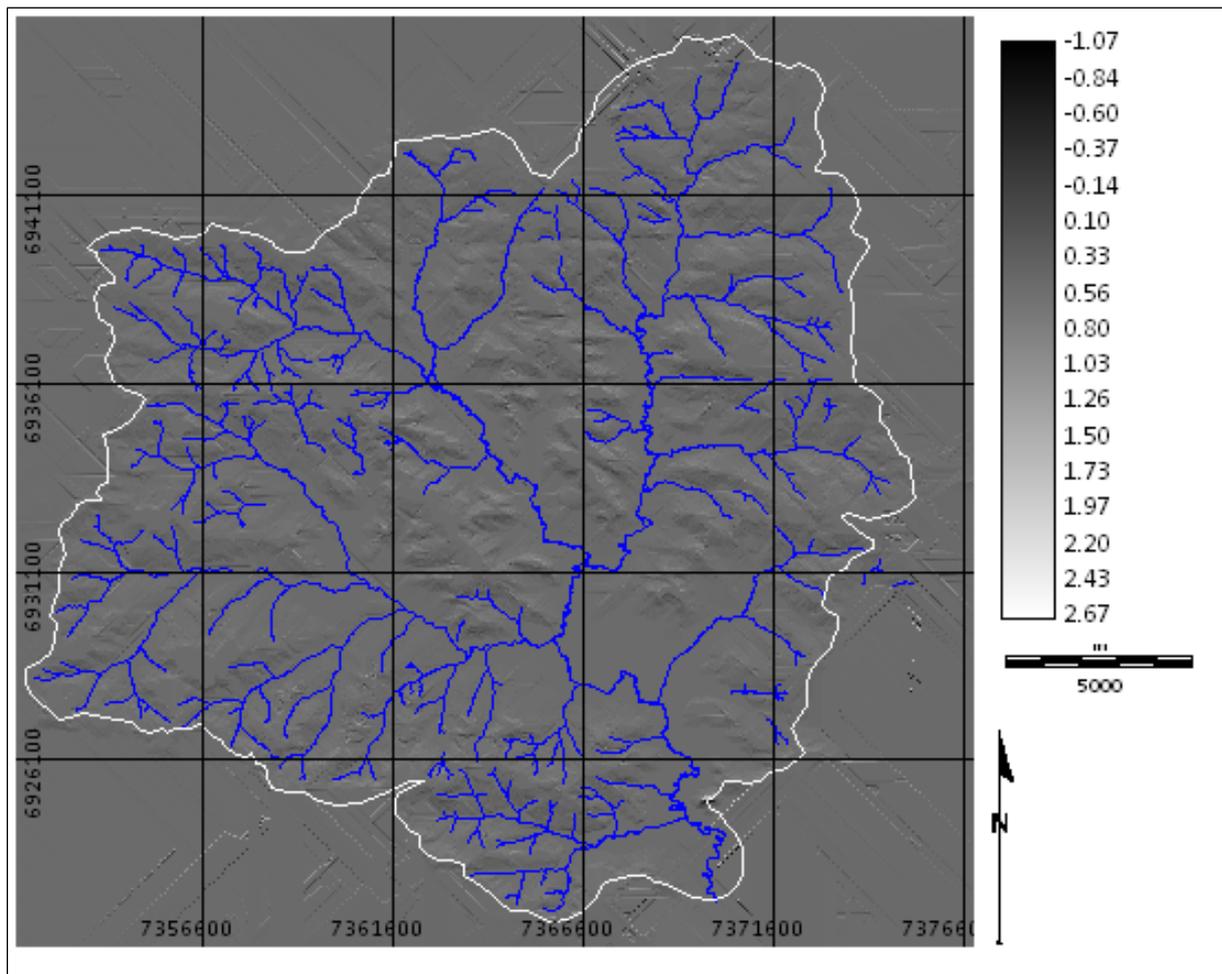


Figura 12: Mapa de iluminación de laderas del área de estudio.

2.8. Imagen satelital:

La clasificación no supervisada de las imágenes satelitales Landsat TM 5, permitieron zonificar para uso y cobertura del suelo, para los dos criterios mencionados anteriormente análisis interanual y intraaual.

Estas imágenes fueron sometidas a procesos de correcciones atmosférica, radiométrica, geométrica y espacial. Las fechas de las imágenes Landsat 224/079 utilizadas en la zona en estudio, para lograr una cartografía base de uso y cobertura del suelo son:

- 6 de marzo de 1999
- 30 septiembre 1999
- 16 de febrero de 2004
- 7 de junio de 2004
- 27 de diciembre de 2008
- 13 de febrero 2009

A continuación se presenta la figura 13 que representa a la imagen satelital TM 224/079 de la fecha 2 de abril de 2009 con una combinación de banda RGB -123.

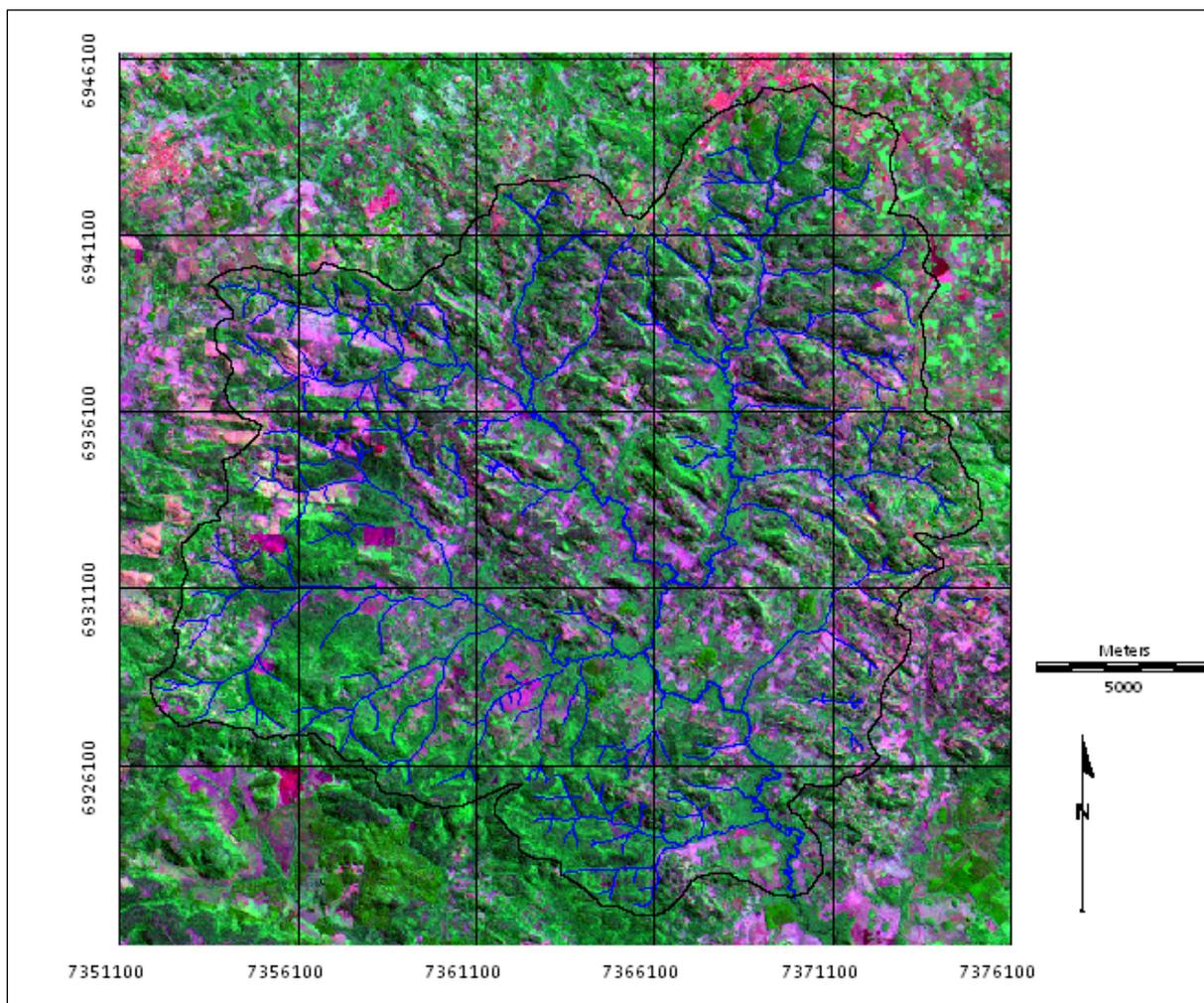


Figura 13: Imagen satelital Landsat 224/079 de la Cuenca del Arroyo Itacaruaré.

2.9. Mapa geológico:

En este mapa podemos observar la zonificación de la composición y estructura de los materiales originales sobre los cuales se desarrollaron los suelos de la región. (Figura 14).

Los tipos litológicos presentes en el área de estudio, se pueden reunir en:

- (A) sedimentos aluvionales recientes,
- (B) efusivas básicas “Series de las Volcánitas”,
- (La) lateritas “tierra coloradas”. (C.A.R.T.A. 1964)

El mapa geológico original con escala 1:50.000, presenta una subdivisión de la serie efusiva (B) en once unidades estratigráficas, de los cuales en el área de estudio se encuentra B1 - B 2 - B 3 - B 4 – B 5.

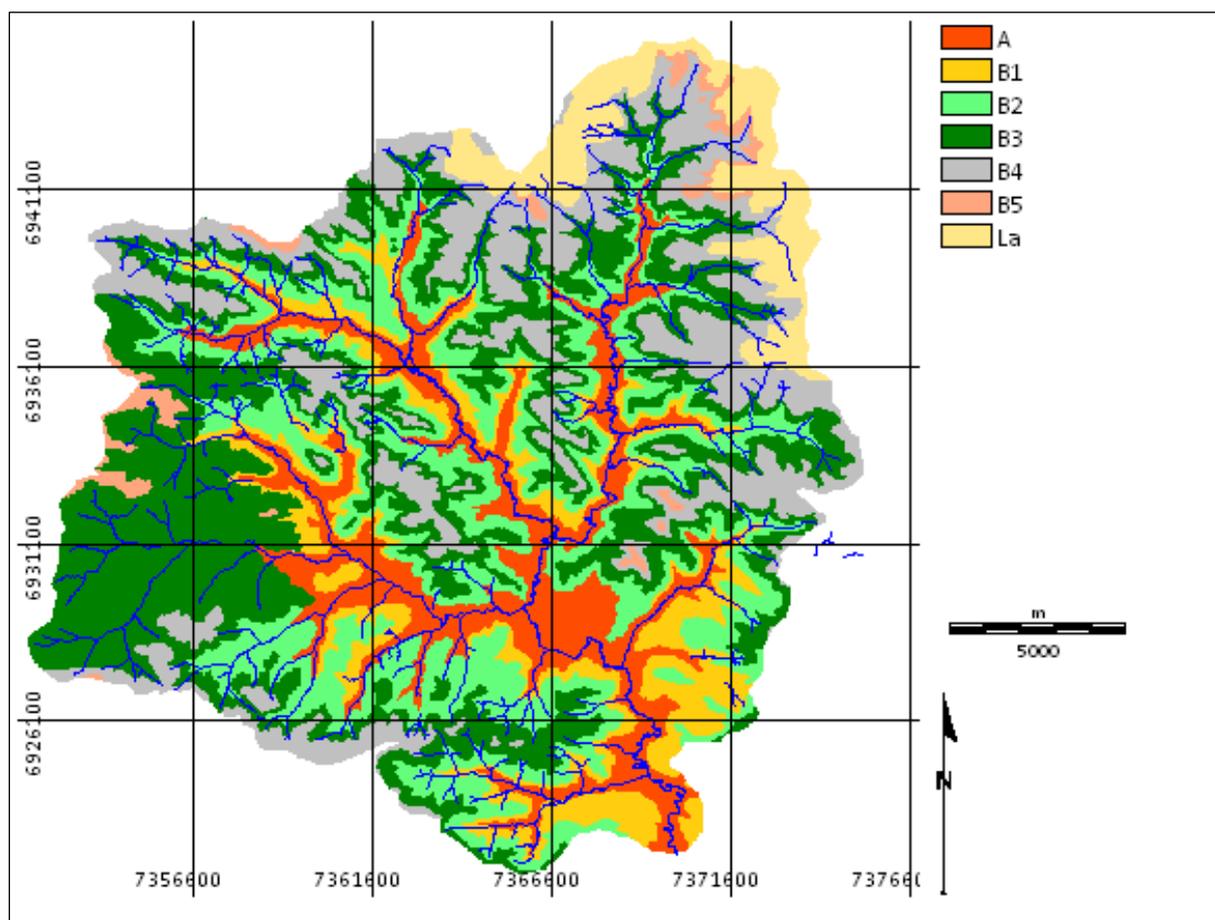


Figura 14: Mapa geológico de la Cuenca del Arroyo Itacaruaré.

En la tabla 15 se presenta la superficie de ocupación de los tipos litológicos presentes en la cuenca.

Leyenda	Superficie (km ²)
A	49,41
B1	34,89
B2	73,49
B3	107,40
B4	60,92
B5	6,39
La	20,41

Tabla 15: Superficie ocupada según categorías geológicas.

A continuación se presenta la descripción en particular de los tipos litológicos presentes en la cuenca.

(A) Sedimentos aluvionales recientes

Los aluviones recientes se representan por estrechas bandas a lo largo del río Uruguay y los principales arroyos. Estos están constituidos en la mayor parte por arenas acumuladas por los ríos en los períodos de crecida y no se extienden a formar valles de importancia en la provincia.

La relativa escasez de materiales sílico- arcillosos en estos aluviones recientes está en buena relación con el estado erosivo que presenta la morfología natural de la cuenca.

(B) Efusivas básicas “Series de las Volcánitas”

Estos materiales han salido de fracturas que han alcanzado el Sima a través del basamento cristalino. Del estudio en el microscopio de las muestras y por los datos relativos de los análisis químicos realizados, faltan diferencias notables. Este hecho, junto a las dimensiones mismas del fenómeno efusivo, excluye la posibilidad de volcanismo de “sacca”, cuyos productos presentan siempre diferencias litológicas de las rocas sedimentarias.

En algunas muestras se ha notado la presencia de individuos de olivina, mientras en otras este mineral es casi ausente. Tal hecho lleva a estos tipos magmáticos al límite entre los basaltos pacíficos normales del Sima y las zonas más altas de mezcla parcial entre el Sima y el sial que está arriba. Magmas de este tipo se encuentran frecuentemente, por ejemplo, a lo largo de las grandes líneas de dislocación que han formado los arcos pacíficos, difícilmente se encuentran en zonas interesadas por la tectónica local.

Estructuralmente presentan una textura intersertal. En algunas muestras, se ha observado una tendencia de la textura a moverse hacia términos si no claramente de tipo ofíticos por los menos absolutamente intersertal. En otras palabras, parece que el orden de cristalización haya seguido una dirección distinta de la establecida por la serie de Bowen. En efecto el piroxeno, que habría tenido que cristalizar primero con relación a la plagioclasa y por eso tener una forma propia, se encuentra en algunas muestras ocupando los espacios libres dejados por la plagioclasa evidentemente ya formada. Semejante inversión en la cristalización se puede obtener por los fenómenos diversos:

- 1) influencia de la presión en el magna silicático;
- 2) influencia de la concentración de los componentes, en este caso de la concentración de las moléculas de plagioclasa respecto a las del piroxeno.

El primer caso ocurre comúnmente en efusiones submarinas, durante la evolución de geosinclinales y por esto, bajo fuertes presiones de magna indiferenciado con la formación de la coladas diabásicas. El segundo caso, la variación de la concentración de los componentes, puede estar relacionado a hechos de débiles diferenciaciones ácidas, debidas a asimilación de materiales del basamento cristalino que cambiaría la composición del magna hacia un tipo diorífico. Estando la primera hipótesis excluida en bases geológicas, a causa de las intercalaciones del tipo continental, es necesario dar paso a la segunda.

Las Series de las volcánitas, B1 – B11: son unidades estratigráficas de rocas basálticas referidas al Jurásico generalmente separadas entre ellas por medio de zonas de escorias particularmente continuas; que influyen claramente el relieve topográfico. En algunos casos de estas zonas se observan lentes o capas de piroclásticos y más raramente lente o restos de arenisca continental. Las lavas presentan composición química y estructura petrográfica de tres tipos:

- OLIVINBASALTOS: con plagioclasa 60% anortita; augita, magnetita, olivina generalmente alterada a oddingsita. Frecuente.
- BASALTOS: con plagioclasa 60% anortita; augita, magnetita, el piroxeno es más abundante que la plagioclasa. Abundante.
- ANDESITAS: con plagioclasa 50%, ortita, augita, magnetita. La plagioclasa es más abundante que el piroxeno. Raro. Estas rocas presentan una estructura petrográfica andesítica y un contenido de sílice muy próximo a lo de los basaltos.

(La) Lateritas “tierra coloradas”

Las lateritas (tierra colorada) cubren principalmente las rocas de la serie ígnea. La cubierta continua más extensa se distribuye a lo largo de la franja del río Paraná y del Iguazú. Afloramientos extensos, pero más fragmentarios por la actividad erosiva, ocupan la parte alta de la sierra mediana (L.N. Alem, Dos de Mayo y San Pedro) en sus partes más llanas. Se trata de depósitos residuales producidos por el ataque químico y alteración en sentido laterítico de las rocas efusivas, que no presentan estratificación evidente. En sentido vertical según el grado de evolución sufrido, se nota una degradación diferente.

La clasificación de estos productos de la alteración en varios miembros de diversa edad, siempre resulta difícil y de dudosa autenticidad. La situación de estos sedimentos residuales claramente definida, la determinación cuidadosa de su edad presenta un interés práctico bastante menos que el teórico.

El estudio petrográfico y químico de estas rocas presentan dos aspectos principales de interés aplicativo:

- 1) cualidad y características de los suelos agrarios y forestales;
- 2) posibles enriquecimientos de Al. Fe. Susceptibles de explotación económica.

2.10. Mapa de suelos:

De las once unidades cartográficas pertenecientes a la Provincia de Misiones solo se identificaron en la Cuenca del Arroyo Itacaruaré seis unidades cartográficas, siendo las siguientes: unidades 3, 4, 5, 6a, 6b, y 9, cada una de ella representa una asociación de series de

suelos. El análisis y descripción de estas unidades cartográficas también se basan en los perfiles de suelo tomados de los 54 puntos.

En el ítem 4 donde se desarrolla la determinación del índice de erodabilidad (K), se presenta el análisis descriptivo de los 54 perfiles.

En el mapa de suelos se puede visualizar la distribución de las distintas unidades cartográficas de suelos en la Cuenca del Arroyo Itacaruaré (Figura 15).

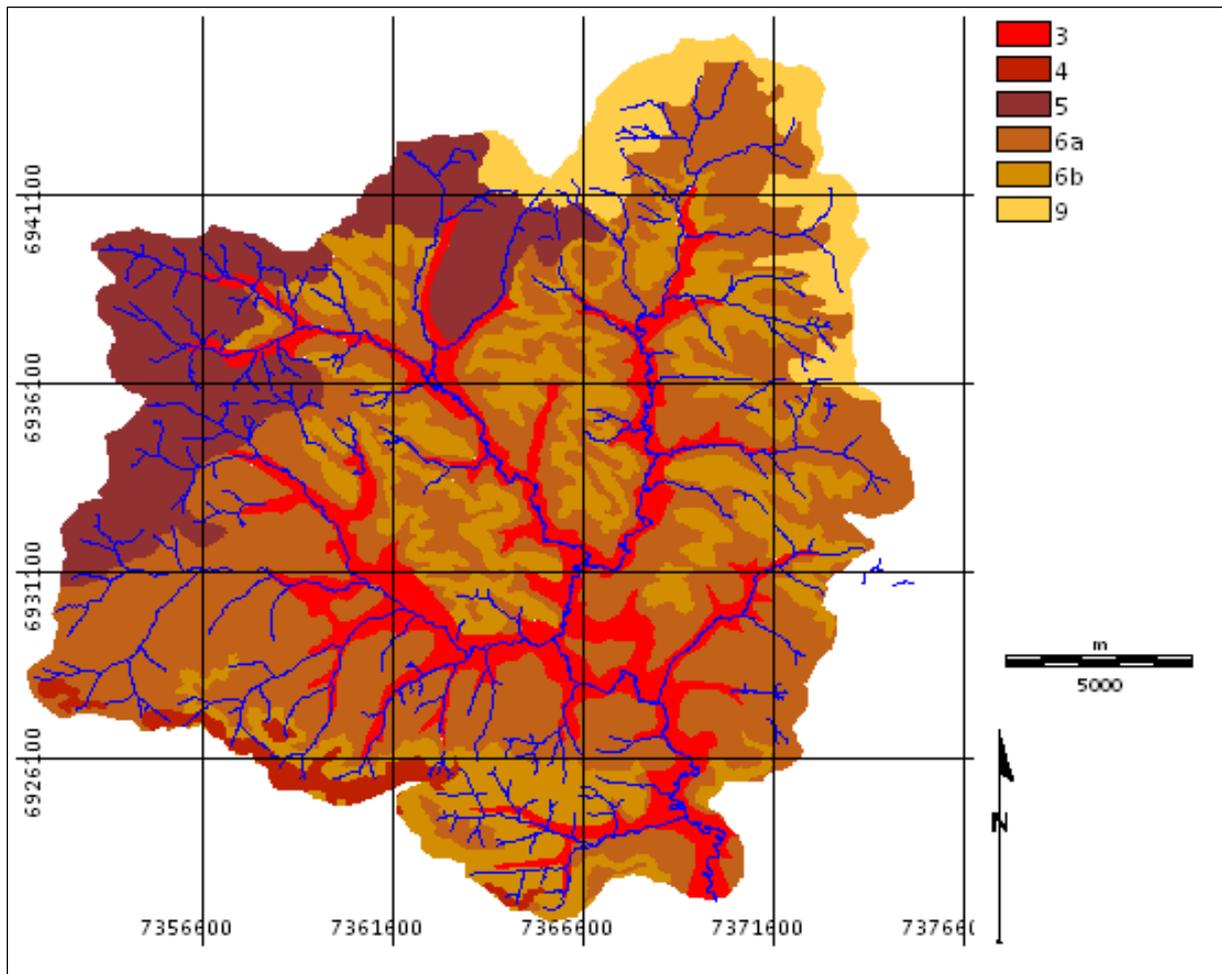


Figura 15: Mapa de suelos de la Cuenca del Arroyo Itacaruaré.

A continuación se presentan en la tabla 16 las superficies (km²), que ocupa cada una de las unidades cartográficas de suelo en la cuenca y subcuencas.

Subcuencas	Área de U.C.S. (km ²)						Total
	3	4	5	6A	6B	9	
1	10,38	0,00	32,19	19,02	17,88	2,32	81,79
2	7,54	0,00	1,87	45,09	21,63	19,76	95,89
3	1,99	0,00	0,00	1,55	0,45	0,00	3,99
4	14,58	5,71	15,43	56,41	11,60	0,00	103,73
5	3,04	0,00	0,00	15,50	4,75	0,00	23,29
6	3,94	0,00	0,00	6,51	1,30	0,00	11,75
7	2,58	0,57	0,00	3,17	12,54	0,00	18,86
8	2,82	0,00	0,00	5,17	1,56	0,00	9,55
9	2,16	0,00	0,00	1,69	0,33	0,00	4,18
Cuenca	49,03	6,28	49,49	154,11	72,04	22,08	353,03

Tabla 16: Superficie de unidades cartográficas de los suelos de la cuenca y subcuencas.

Se detalla a continuación una descripción de las unidades cartográficas de suelo para la Cuenca del Arroyo Itacaruaré, según C.A.R.T.A (1964).

UNIDAD CARTOGRÁFICA 3) Esta unidad cartográfica contiene numerosos suelos, sistemáticamente aun muy lejanos, asociados geográficamente y no separables más que por relevamiento directo de cada uno de los tipos componentes.

Todos se hallan en análogas condiciones de morfología sobre terrazas que transcurren a lo largo del álveo de los principales arroyos. Estas terrazas son resultado de la erosión sobre el basalto o de un sedimento aluvional. En algunos puntos se trata de aluviones que han sufrido un transporte muy limitado, particularmente aquellos torrentes que atraviesan zonas de tierras rojas, donde es cultivada y está sujeta a fenómenos de erosión intensa.

Los suelos que derivan del basalto a de los aluviones son muy diferentes, ya sea desde el punto de vista genético y taxonómico o de la fertilidad. Desde el punto de vista físico, son casi todos hidromorfos y arcillosos. Las correlaciones geográficas existentes entre ellos se ven el esquema (Figura 16)

Este esquema representa una situación ideal. El río se desliza en un álveo escaso, estrecho y profundo, muchas veces con la base incisa en el basalto, en sus márgenes muestra dos albardones sobreelevados con respecto a la terraza, cubiertos generalmente por un bosque en galería o por un monte más alto. Sigue después el rellano de las terrazas sobre el basalto o de sedimento aluvional. Esta pequeñas terrazas son todavía remontadas por la aguas del rio en

las fases de inundación, el albardón de cuando en cuando está interrumpido particularmente en el embocadero de un meandro, ante una curva o de una inversión de la dirección del curso, y durante las inundaciones el llano de la terraza sirve como curso secundario de las aguas.

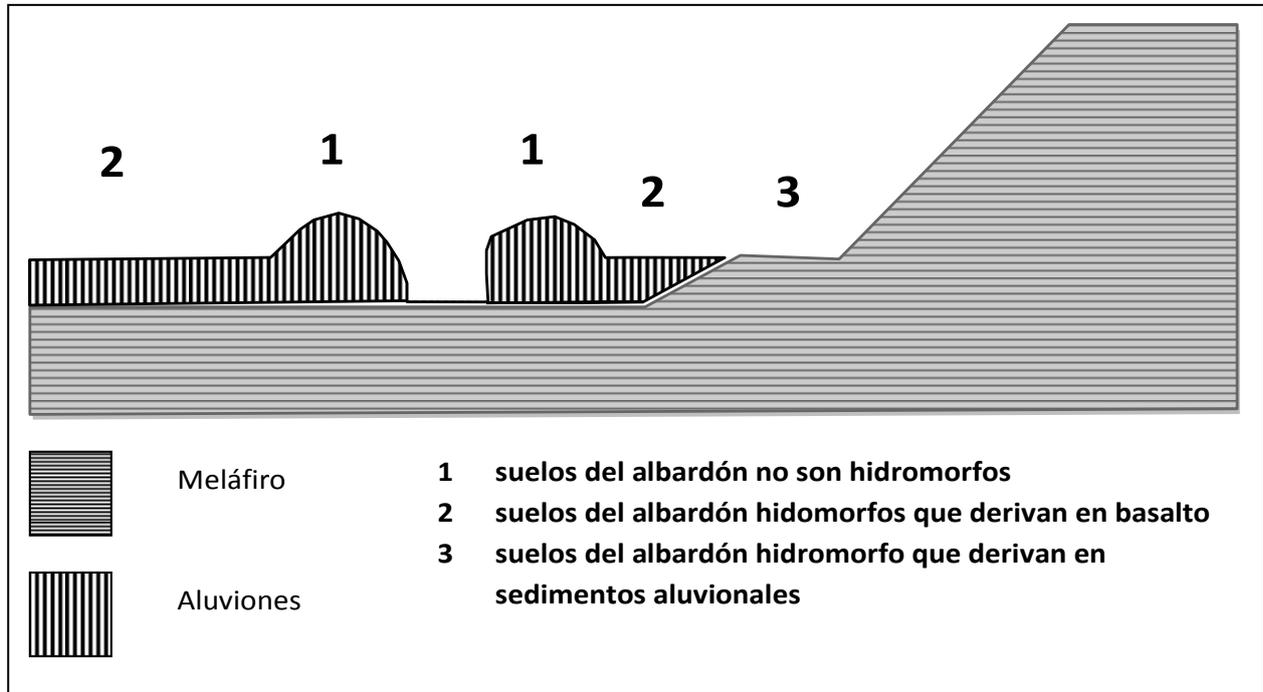


Figura 16: Situación ideal de la disposición de los suelos en las terrazas.

Los albardones están sumergidos sólo por períodos muy breves y muchas veces aún con el río en inundación quedan sobre la superficie del agua. Apenas las aguas descienden de nivel, tienen la posibilidad de escurrir el exceso hacia el talweg en cuyo fondo emergen por lo menos de dos a tres metros sobre la terraza, por el contrario, permanecen mucho tiempo, dando lugar en primer término a extensiones de agua, después a pequeños bañados con drenaje, debido en gran parte a evaporación y a escurrimiento, muy poco de infiltración. De esto deriva que los suelos del albardón (N°1 en la Figura16) no son hidromorfos, mientras los (N°2 y 3) son hidromorfos, sea que deriven de basalto, o de sedimentos aluviales.

Se puede hallar estratos de concreciones de hierro y manganeso endurecidos o blandos, pero se vuelven durísimos desecándose, y que ingresan en la definición de plintita. Estos niveles están a toda altura en el perfil, muchas veces profundos, pero se puedan hallar también en posición sub-superficial como requiere la definición de los Plintaquult.

Puede ser que los Ochraquult estén presentes en las morfologías más deprimidas de las terrazas. La diferencia entre estos y los Aquic Typochrult consiste esencialmente en una mayor altura de la napa en el interior del perfil y en su mayor permanencia; precisamente, los Aquic Typochrult tienen fenómenos o colores asociados en la hidromorfía en los primeros 25 centímetros del horizonte arcilloso pero menos intensos de los Aquult. De eso deriva que los subgrupos puedan coexistir en condiciones morfológicas no muy diferente.

La posición morfológica de los suelos y el material del cual han tomado origen, se explica especificando lo que sigue: en la zona N°1 de la figura 16, sobre el estrecho albardón formado por sedimentos aluvionales, hay exclusivamente suelo hidromorfos, estos solo en algunos casos sobre sedimentos de edad más avanzada y ya sujetos a procesos de migración de la arcilla (lixiviación). En la zona N°2 de la figura 16, sobre el rellano de la terraza derivada de sedimentos aluvionales hemos encontrado en preponderancia suelos lixiviados, pobres y ácidos, o subordinadamente suelos jóvenes sobre aluviones de deposición reciente y en particularmente en el caso que el torrente se deslizase en zonas sujetas a intensa erosión.

En la zona N° 3 de la figura 16, derivados de basalto, se encuentran suelos que normalmente forman parte de los Mollisoles de la "7ª Aproximación". Estos son suelos negros arcillosos muy similares a los Block Tropical Soils o Black Cotton Soils de los Autores de lengua inglesa, a los Smonitza de los Rusia, a los tirs de África del Norte, a los suelos negros mediterráneos italiano.

Las características físicas- químicas de todos estos suelos, están dadas por aquellos los suelos que provienen de los aluvionales y los que provienen de la alteración de melafiros. La primera roca es generalmente pobre, tratándose de materiales ya fuertemente meteorizados antes de haber sido tomados en suspensión y nuevamente depositados. Las condiciones físicas de estos suelos son desfavorables, y se exceptúan los perfiles que se han formado sobre el albardón de los arroyos, que por otra parte representan solo un pequeño porcentaje en la unidad cartográfica considerada, tienen todos fenómenos con hidromorfia más o menos profunda, desaguan con extrema dificultad, son muy duros cuando se secan, tienen una porosidad débil y por consiguiente son asfícticos y desfavorables a muchas plantas. Químicamente son ácidos.

Al contrario de los suelos que derivan del basalto son más fértiles, tienen un pH más alto y normalmente cerca del 6, están saturados en más de 50% muchas veces también en 60-70%. Presentan contenidos no despreciables de Ca, Mg, K, etc. Pero son generalmente bastantes pobres de anhídrido fosfórico. Desde el punto de vista físico son arcillosos o arcilloso-limosos, hienden fácilmente, tienen drenaje lento en profundidad, pero discretos en los primero 30-50 cm. Los perfiles en posición morfológica menos deprimida que tienen posibilidad de desaguar mayormente, son muchas veces lixiviados y presentan un B de acumulación muy evidente, aunque no siempre bastante desarrollado, que entran en la definición de horizonte "argillico".

UNIDAD CARTOGRÁFICA 4) Esta unidad contiene los suelos menos evolucionados. Con escasísima posibilidades de explotación agrícola. Se hallan generalmente sobre morfología muy llana, en la base o en la cumbre de los cerros, sobre coladas de basalto duro del tipo más bien cristalizado, sin vidrio, generalmente fácil de alterarse y por eso capaz de dar rápidamente origen a un suelo profundo. Estas unidades de suelo esta relegadas a la mayor parte de las veces en zonas que ha sufrido una acción antrópica fuerte con relativa erosión del suelo. Se hallan también en el monte, donde la acción del hombre ha sido nula, pero nunca son unidades muy grandes. Estas unidades se distribuyen en coincidencia con coladas de basalto particularmente duras, que son atacadas por los agentes atmosféricos y orgánicos con mucha

lentitud por lo cual aun en ambiente natural el suelo presenta siempre espesores débiles y muchas veces queda directamente sobre la roca compacta.

Tratándose de morfologías muy llanas sobre un basamento duro e impermeable, es claro que las aguas restañen mucho tiempo dondequiera que se halle un pequeño hundimiento. Este hecho esta favorecido sin duda por el clima muy lluvioso en la zona que permite la formación de suelos hidromorfos negros arcillosos, en todo idénticos aquellos descritos en la unidad precedente para la terrazas de los arroyos que claramente tienen un morfología igual a esta, llana poco ondulada y por eso capaz de dirigir en la mismas dirección la pedogenesis. En el caso que se intente una explotación estos suelos se obtienen muy pronto una erosión violenta y manchas en las cuales el basalto aflora abundantemente.

Desde el punto de vista físico-químico los suelos hidromorfos de las depresiones y aquellas en condiciones normales de drenaje son totalmente diferentes. De los primeros se ha dicho difusamente en la unidad cartográfica precedente. Son suelos negros arcillosos medianamente fértiles con contenido de fósforo mediocre, se desaguan despacio y, por los menos a los 30.50 cm., y tienen fenómenos conexos con el permanecer de las aguas como concreciones de hierro y manganeso, colores con croma muy bajo, a veces jaspeaduras. Estos suelos resultan útiles para una favorable agricultura especialmente si se usan algunas planta aptas para ello-, pero se trata de unidades muy poco extensas muchas veces de dimensiones muy reducidas, intercaladas con un mosaico de transición a los otros suelos no hidromorfos. Por eso no ha sido siempre posible cartografiarlas separadamente, cosa que hemos hecho cada vez que hemos notado áreas delimitables y representables a la escala usada.

Los perfiles no hidromorfos tienen siempre espesores limitados. En casi todos los casos hemos encontrado la roca cerca de 35-45 cm; muy frecuentemente se trataba de bancos de roca dura, continuos, pero aun en el caso que encontrara la roca fracturada, los fragmentos eran durísimos, de roca reciente.

Desde el punto de vista físico, no obstante sean suelos con capacidad para el aire y posibilidad de drenaje normales, falta de espesor, se desecan con rapidez, ofrecen un ambiente hostil a las raíces, son muy ricos en cascajo basáltico duro inalterado y por eso lento en el ceder elementos de fertilidad.

El cascajo es muy abundante, el 50-70% entre 15-25 cm, y siempre inalterado. Son aun suelos fácilmente erosionables, por lo cual al menos en un primer momento conviene abandonarlos, dejando que el monte los proteja o utilizarlos para pasturas donde este ha sido ya eliminado.

UNIDAD CARTOGRÁFICA 5) Esta unidad ha sido creada para algunas zonas y particularmente para los alrededores de Cerro Azul en los cuales los suelos que normalmente pertenecen a las unidades 6 y 9 aparecen ocupando áreas pequeñas y que se intercalan entre ellas, de modo que ha sido imposible correlacionarlas con los elementos del paisaje que se pueden hallar sobre las fotografías. La zona de Cerro Azul tiene un paisaje suave, indeciso, con declive ni fuertes no débiles y esta colonizada desde mucho tiempo y sometida a una agricultura intensiva que utiliza el suelo para cultivos varios. Muchas veces hay cultivos del

mismo tipo sobre suelos diferentes entre ellos. Esto hace que no se puedan utilizar los cultivos como indicadores de suelos, ni se pueda hacer referencia a elementos de la morfología. En esta zona se reunieron uno con otro los suelos presentes, ya que en las unidades con las cuales ellos se presentan son muchas veces pequeñas o no cartografiables a la escala empleada.

Por lo que se refiere a los caracteres de los suelos contenidos en esta unidad no queda más que referirse a las unidades 6 y en particular 6 A y unidad 9.

UNIDAD CARTOGRÁFICA 6) Se distinguen dos fases:

- a) En morfología llana o poco inclinada. Escaso peligro de erosión, perfil más profundo
- b) En morfología fuertemente inclinada. Fuerte peligro de erosión, perfil superficial.

Esta unidad cartográfica de la cual forman parte los suelos más fértiles y que vienen comúnmente citados con el nombre de “suelos pedregosos” por la presencia de fragmentos de roca, a veces también en los primeros centímetros del perfil. Son suelos muy jóvenes a perfil A, C ó ABC con un horizonte cámbico y por eso sin una clara señal de alejamiento de los coloides. Estos derivan de la alteración del basalto, siendo pocos profundos y pocos desarrollados. Mantienen también muchos elementos de la fertilidad presentes en él. Muchas veces hay en el perfil fragmentos de roca en curso de alteración que representan una reserva considerable de estos elementos.

Desde el punto de vista evolutivo se pueden definir dos grupos, de los cuales uno para los suelos que tienen un perfil menos desarrollados con diferenciación de solo dos horizontes, un A y un C, y un segundo grupo para los suelos que tienen ya un horizonte B y por eso aún mayor profundidad.

Los suelos de esta unidad son todos muy fértiles. Esta unidad cartográfica está formada por suelos muy buenos. Los contenidos de calcio, potasio, nitrógeno y la alteración que se puede hallar en el perfil, reconstituye continuamente las reservas de minerales extraídos por la vegetación natural y por la lixiviación. La rápida alteración de la roca, particularmente donde no está bien cristalizada, da origen en el suelo a un material amorfo, no cristalino, que toma el nombre de alófono, los suelos que contiene este material han sido estudiados particularmente por los japoneses que los denominaron “Ando”, término que se ha difundido por todas partes. Aún la “7ª aproximación” de la clasificación de los Estados Unidos ha adoptado esta raíz llamando a estos suelos Adenpt.

Los suelos “pedregosos” tienen alófono, pero este mineral evoluciona con rapidez hacia otros minerales arcillosos, cristalinos, el suelo con el tiempo se hace más profundo. Prácticamente el alófono es dominante solo en los suelos superficiales donde abundan los escombros de roca en alteración, pero cuando el espesor del suelo aumenta, la parte superior de este, no ya influenciada por el basalto en alteración, sufre sucesivos fenómenos de transformación, exclusión de sustancias y formación de nuevos minerales por los cuales materiales que contienen alófono no dominan ya el conjunto coloidal inorgánico del suelo si bien están siempre presentes.

UNIDAD CARTOGRÁFICA 9) Esta unidad contiene aquellos suelos que reciben el nombre de “tierra colorada”. Son Suelos de color rojo fuerte derivados del basalto con un proceso de alteración profunda del tipo laterítico que ha alterado profundamente los silicatos que constituyen la roca. En el suelo hay solo leves trazas de minerales alterables y predominan óxidos de hierro, de aluminio y arcillas de neoformación con retículo 1:1. De éstos derivan suelos con capacidad de intercambio muy baja, pobres.

Estos perfiles presentan una diferencia muy clara en el contenido en elementos de la fertilidad entre los horizontes superficiales y los profundos. El horizonte A de los suelos bajo monte, es siempre muy rico, con una saturación de los coloides que llega 60 – 80 % entre los cuales se encuentra bastante potasio y P₂O₅ total. La capacidad de intercambio que en profundidad no es muy alta, se eleva notablemente en el horizonte que tienen humus, pero sólo en éstos, por los cual se vuelven mucho menos fértiles y dan producciones mucho más escasas cuando, por erosión o falta de reposición el contenido de MO se reduce excesivamente.

Es muy importante en las prácticas agrícolas procurar reducir al mínimo la erosión y de mantener alto el porcentaje de sustancia orgánica

Muestran un fuerte y constante aumento del contenido de arcilla entre el horizonte A y el B, debido a los procesos de lixiviación, y el fuerte porcentaje de arcilla de los horizontes profundos. No obstante, el drenaje de estos suelos no es excesivamente lento. En efecto mucha de esta arcilla que aquí es intensa en el sentido dimensional, es decir como fragmentos de dimensiones inferiores a 2 micrones, está constituida de óxidos y arcillas cristalina con baja capacidad de intercambio y baja capacidad de expansión. Por eso, los Rhondochrult se hinchan poco cuando se mojan y escurren el exceso de agua en un espacio de tiempo muy breve. Uno de sus principales defectos es la erodabilidad, la erosión se hace violenta especialmente después que ha sido destruido el horizonte A que tiene humus. Este funciona un poco como un conjunto protector por su alta porosidad y facilidad de ser penetrado por las aguas impidiendo la erosión del suelo. Una vez alterado, las aguas actúan sobre el horizonte B que siendo mucho más arcilloso y con drenaje más lento, no deja cruzar por las aguan que hayan un camino más fácil en el flujo superficial. Por eso excavan my pronto largos canales (erosión en zanjas) que se profundizan cada vez más, llevando masas ingentes de tierra socavando los cultivos. Se puede concluir que la “tierra colorada “es un suelo fértil y físicamente bueno mientras se controle la erosión.

2.11. Mapas de cobertura vegetal y uso de suelo:

Se realizo la identificación de los distintos usos y coberturas de suelo mediante una clasificación no supervisada de la imágenes satelitales Landsat 224/079.

Las clases de uso y cobertura que caracterizan a la Cuenca del Arroyo Itacaruaré se describen a continuación:

- Bosque Alto, que abarca una vegetación de bosque nativo e implantado con una cobertura del suelo mayor al 75%.

- Matorral- Cultivos Industriales: esta clase agrupa las capueras o bosque secundario con un estado inicial de desarrollo. También incluye cultivos industriales como yerba y té que poseen una grado de cobertura menor al 75%.
- Pastizal –Áreas Agrícolas. En esta clase se encuentran los pastizales naturales y las pasturas, así también como los cultivos anuales tales como maíz, tabaco, mandioca, soja. Esta clase tiene el menor grado de cobertura de suelo y está incluido en ella el suelo desnudo, arado, y/o recién sembrado.

Los cambios temporales de la cobertura del suelo permitieron generar la cartografía y el análisis en los años de estudio y en las distintas épocas del año.

A continuación se presentan los resultados alcanzados del análisis cartográfico geoespacial y sus resultados tabulares.

- 1) **Estudio interanual:** en las figuras 17, 18 y 19 se observa los distintos tipos de cobertura vegetal que se identificaron en los años 1999, 2004, 2009, junto a las figuras el gráfico de superficie de las distintas clases de cobertura de cada subcuenca.

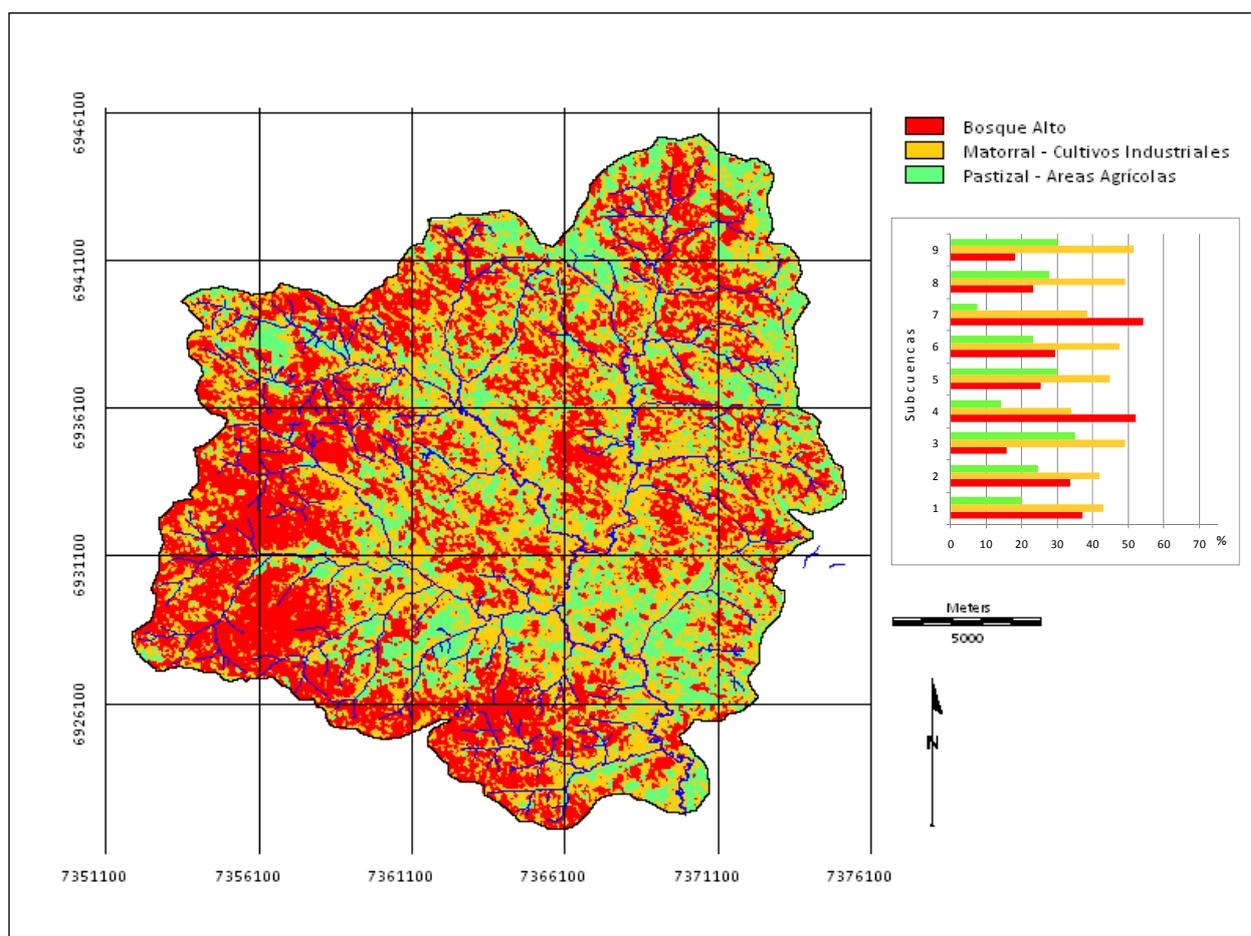


Figura 17: Mapa de cobertura vegetal y uso del suelo para 6 de marzo de 1999 de la Cuenca del Arroyo Itacaruaré. Representación gráfica del % de ocupación por subcuenca.

En la figura 17 que representa la zonificación de la cobertura vegetal y uso del suelo para el mes de marzo de 1999, se observa una superficie mayor al 50 % de bosque alto en la subcuenca 4 y 7, siendo las subcuenca 2, 5, 6 y 8 las que presentan entre el 20 % y 50 % de superficie forestada. Las subcuencas 3 y 9 tienen una reducida superficie de cobertura de bosque alto. Este tipo de cobertura se presenta principalmente en los límites superiores de las subcuencas y en las faldas de laderas.

En relación a la cobertura vegetal expresada por el matorral y cultivos industriales todas las subcuencas presentan una superficie mayor al 20 % y superando solo la subcuenca 9 una superficie de 54 %.

Los pastizales y las áreas agrícolas se presentan con una superficie mayor al 20 % en todas las subcuencas exceptuando las 4 y 7 que tienen una superficie de 14 % y 7 %, respectivamente. Este tipo cobertura se encuentra principalmente en las zonas bajas o bordes de arroyos.

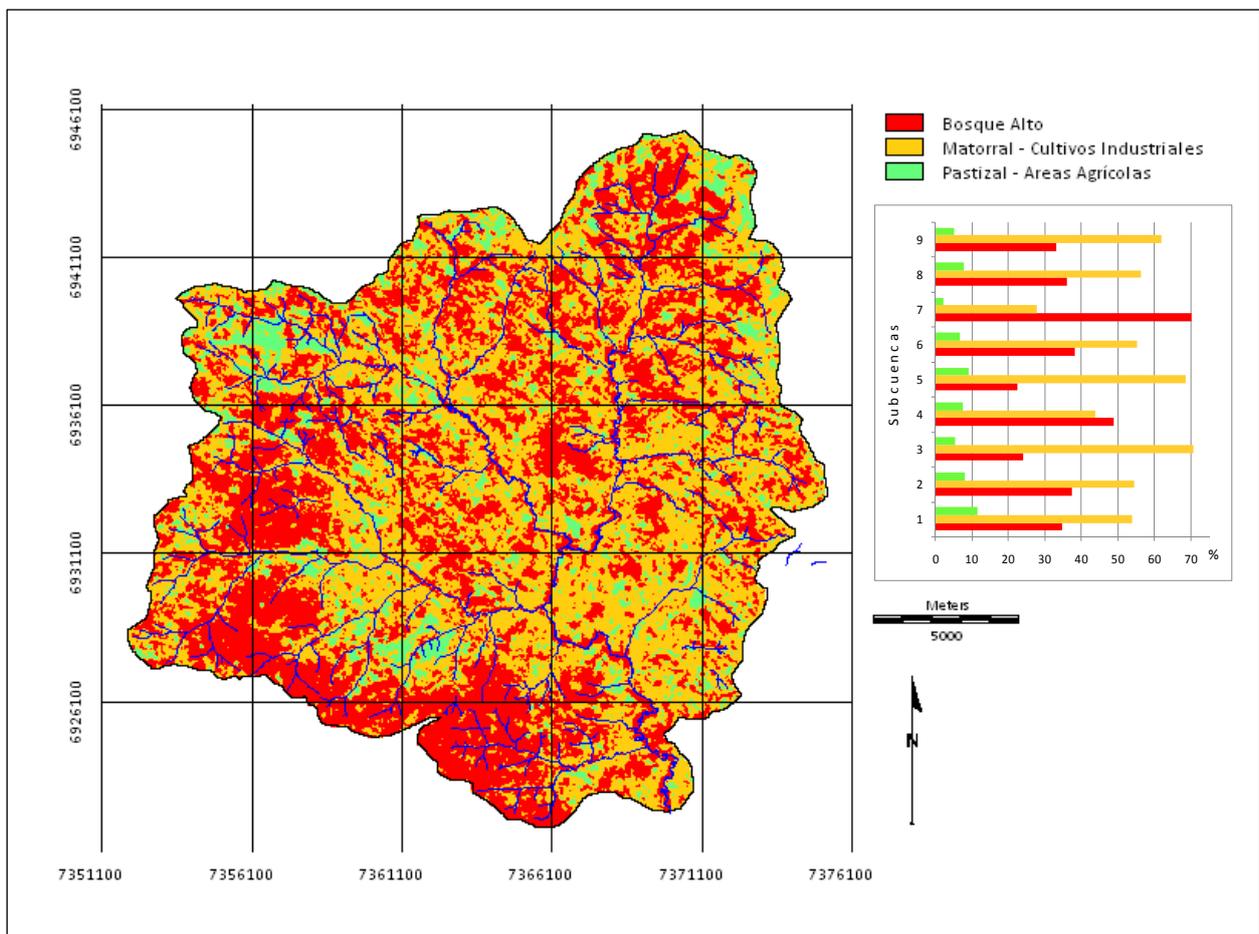


Figura 18: Mapa de cobertura vegetal y uso del suelo para 16 de febrero de 2004 de la Cuenca del Arroyo Itacaruaré. Representación grafica del % de ocupación por subcuenca.

En la figura 18 se encuentra la distribución de la cobertura para el mes de febrero del 2004 de la Cuenca del Arroyo Itacaruaré. Donde se observa que solo la subcuenca 7 presenta

una superficie mayor al 50 % de bosque alto, las demás subcuencas tienen una superficie de bosque alto entre el 20 % y 50 %.

La cobertura de matorral o áreas industriales es la que se encuentra más representada en toda la cuenca. Este tipo de cobertura se localiza en una superficie mayor al 50 % en casi todas las subcuencas, salvo en las subcuencas 4 y 7 que tiene un superficie entre 20 % y 50%.

Los pastizales se presentan con una superficie menor al 10 %. Solo en la subcuenca 1, alcanza valores del 11 % de ocupación.

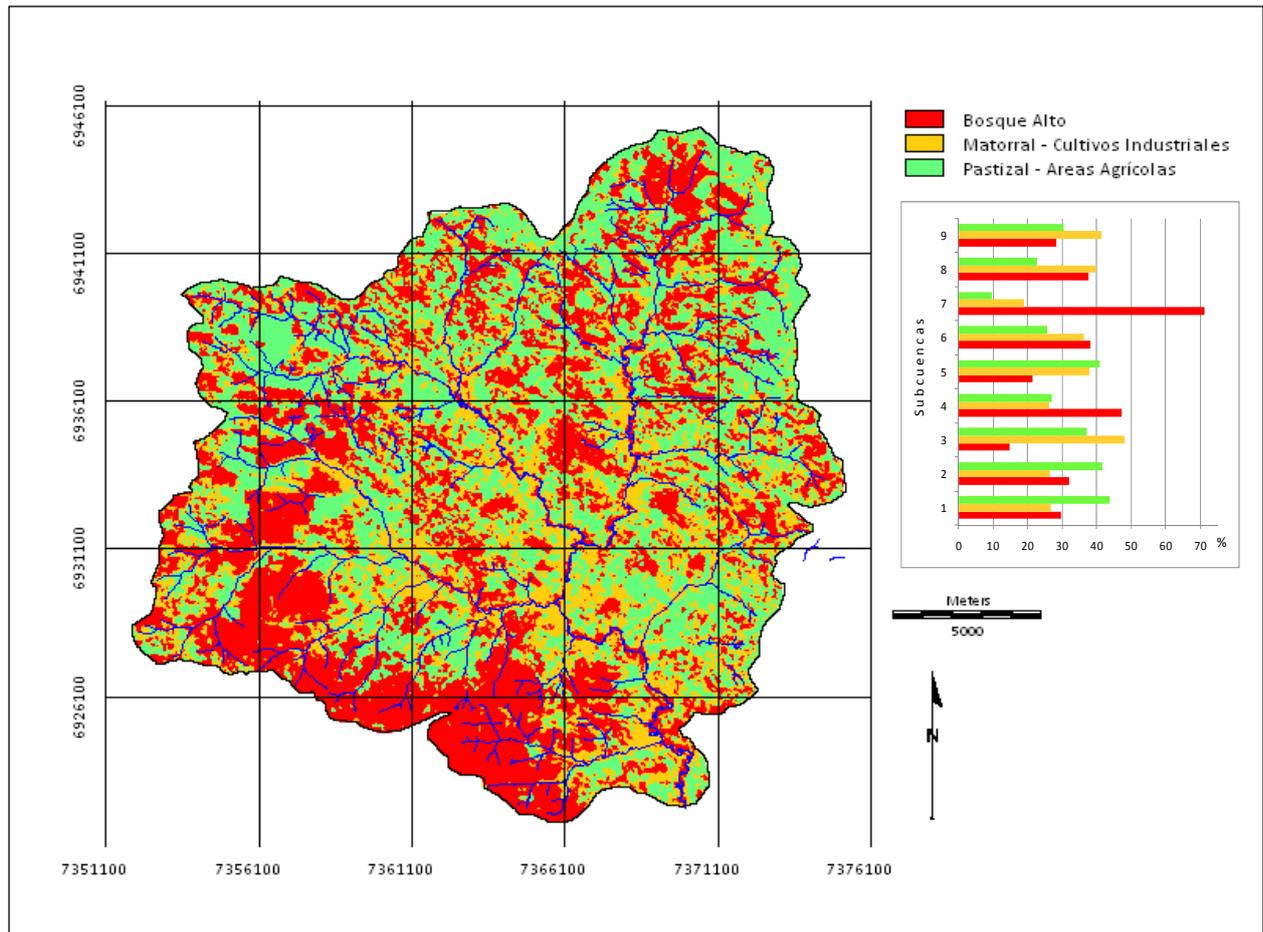


Figura 19: Mapa de cobertura vegetal y uso del suelo para 13 de febrero de 2009 de la Cuenca del Arroyo Itacaruaré. Representación grafica del % de ocupación por subcuenca.

En la figura 19 pertenece al mes de febrero de 2009, en esta se observa los distintos tipos de cobertura vegetal y de uso del suelo en la Cuenca del Arroyo Itacaruaré. La subcuenca 7 presenta una superficie mayor al 50 % de bosque alto, en la zona alta de la subcuenca. El resto de las subcuencas poseen una superficie entre 20% y 50% de forestaciones, con la excepción de la subcuenca 3 que tiene un 14 % de superficie de bosque alto.

El matorral o áreas industriales se presentan en las subcuencas ocupando una superficie menor al 50%. Este tipo de cobertura se presenta principalmente 20% y 50% de las subcuencas.

Solo en la subcuenca 7 tiene una superficie de 19%.

Los pastizales predominan en las subcuenca ocupando una superficie entre el 20% y 50%. La subcuenca 7 es la única que no supera el 20 % de superficie ocupada por pastizales o áreas agrícolas.

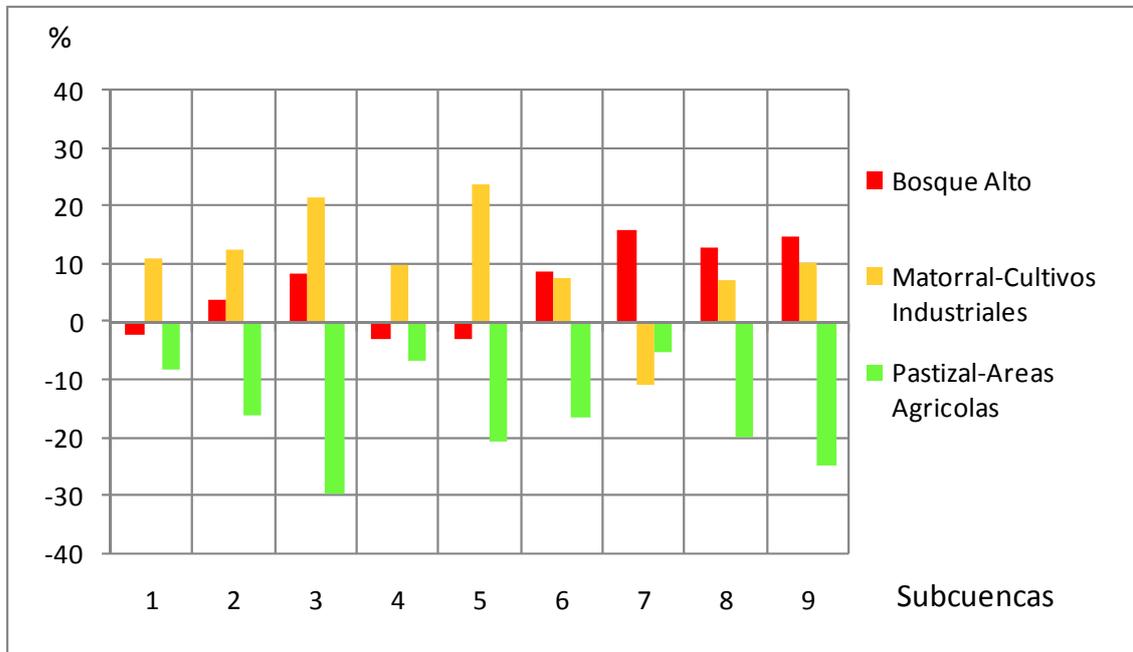


Gráfico 21: Balance de ocupación de superficie según tipos de cobertura vegetal y uso del suelo entre 6 marzo de 1999 y 16 febrero de 2004.

En el gráfico 21 se observa una ganancia de superficie de bosque alto entre marzo de 1999 y febrero 2009. Particularmente las subcuencas 7, 8 y 9 muestran una ganancia mayor al 10 % en superficie, siendo las subcuencas 2, 3 y 6 las que tuvieron una ganancia inferior al 10 %. Se observa que las subcuencas 1, 4 y 5 son las que presentan pérdidas de bosque alto, siendo menor al 10 % de superficie.

Los matorrales o áreas industriales también mostraron ganancias en la mayoría de las subcuencas, salvo en la subcuenca 7 en la cual tuvo una pérdida mayor al 10%. Las subcuencas 3 y 5 tuvieron ganancias mayores al 20 %; las subcuencas 1, 2, 4 y 9 ganaron territorio entre el 10 % y 20 % y las subcuencas 4, 6 y 8 presentaron ganancias menores al 10 %.

La pérdida de superficie de pastizales y áreas agrícolas se manifiesta en todas las subcuencas. Siendo las subcuencas 3, 5 8 y 9 las que sufrieron una pérdida mayor al 20 %, las subcuencas 2 y 6 presentan una pérdida de pastizales entre el 10 % y el 20 % y las restantes 1, 4, y 7 no superan el 10 % de pérdida de superficie de pastizales.

Las ganancias de bosques altos fueron incentivadas, en este período, principalmente a la puesta en marcha de la Ley Nacional 25.080 y los distintos tipos de incentivos para la reforestación que presentaron los municipios que participan en la cuenca. La ganancia de

superficie de los matorrales también se puede explicar por este fenómeno, dado que en un estado inicial del bosque implantado también se encuentran esta categoría de cobertura vegetal.

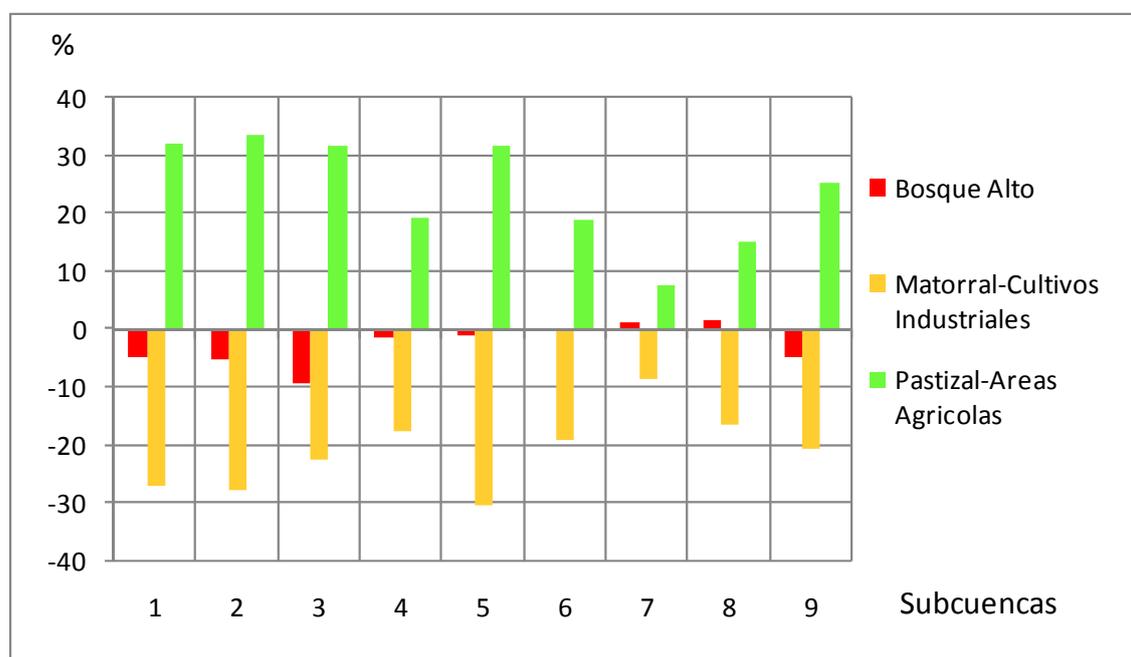


Gráfico 22: Balance de ocupación de superficie según tipos de cobertura entre 16 febrero de 2004 y 13 de febrero de 2009.

En el gráfico 22 de ganancia y pérdidas de superficie (%) entre el mes de febrero de 2004 y el mes de febrero de 2009, muestra una pérdida de tipo de cobertura “bosque alto” en las subcuencas 1, 2, 3, 4, 5 y 9. Estas pérdidas no superan el 10 % de la superficie de la subcuencas. Las subcuencas 6, 7, y 8 presentan una ganancia de bosque alto, siendo esto menor al 10 %.

El tipo de cobertura de matorral o áreas industriales presenta una disminución de superficie en todas las subcuencas, siendo estas pérdidas mayores al 20% en las subcuencas 1, 2 3, 5 y 9. Las subcuencas 4, 6, y 8 sufrieron una pérdida del 10% al 20% de superficie, y solo la subcuenca 7 tuvo una perdida menor al 10 %.

Los pastizales o áreas agrícolas presentan ganancias de superficies mayores al 30% en las subcuencas 1, 2, 3 y 5. La subcuenca 9 tuvo un aumento de superficie de 25%; las subcuencas 4, 6 y 8 presentan una ganancia entre el 10% y 20%. La subcuenca 7 solo alcanza una ganancia de 7%.

Esta pérdida de superficie de bosque alto y ganancia de pastizales se explica por el aumento de aprovechamiento de las superficies forestales en los últimos 5 años, debido al aumento de la tala raza, por la suba del precio de la madera.

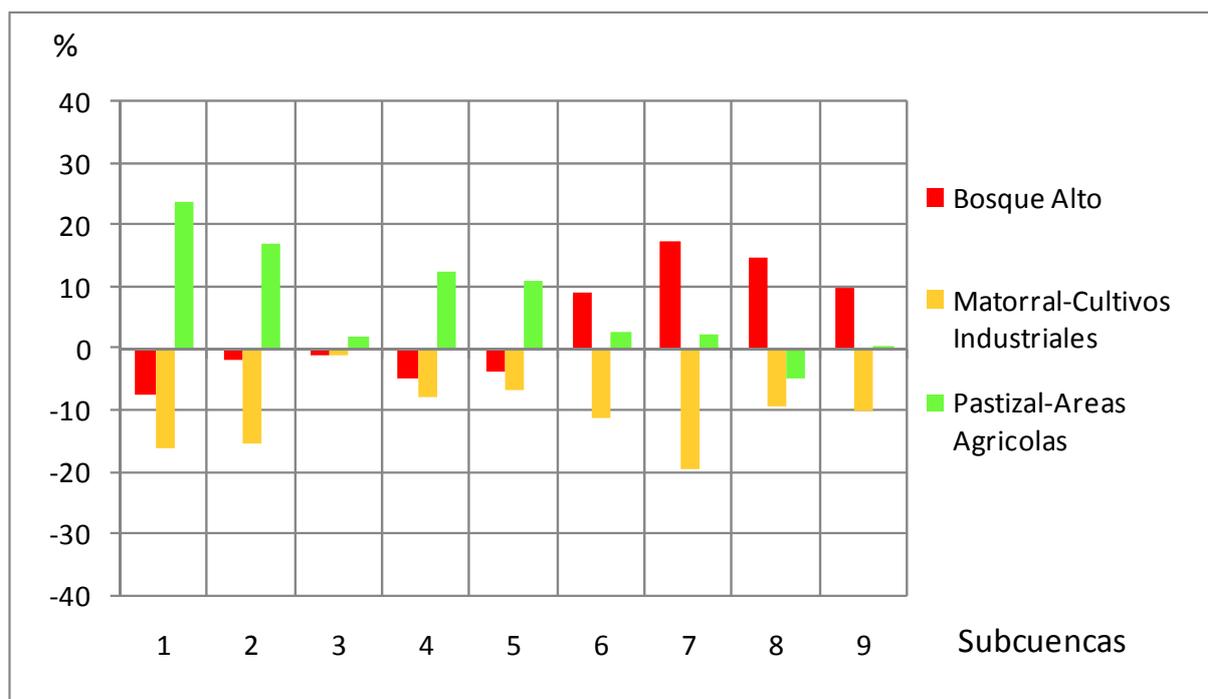


Gráfico 23: Balance de ocupación de superficie según tipos de cobertura entre 6 marzo de 1999 y 13 de febrero de 2009.

En el gráfico 23 se observa los cambios totales de tipo de cobertura y uso del suelo en la última década, en este gráfico se visualiza que las subcuencas 6, 7, 8 y 9 tuvieron un aumento de la superficie de bosque alto, las restantes sufrieron pérdidas.

Se observa que todas las subcuencas tuvieron pérdidas de superficie en el tipo de cobertura vegetal de tipo matorral o áreas industriales.

El pastizal o área agrícola ganó superficie de ocupación en todas las subcuencas exceptuando la 8, en la cual tuvo una pérdida de superficie.

En este gráfico no se puede visualizar bien los fenómenos de reforestación y de aprovechamiento del bosque implantado, que se observa en los gráficos anteriores

- 2) **Estudio intraanual:** en las figuras 17 y 20 se visualiza las diferentes clases de cobertura y uso del suelo identificadas durante un año considerado época húmeda, el 1999 y un año considerado época seca, el 2004 (figura 18 y 21); junto a las figuras el gráfico de superficie de las distintas clases de cobertura de cada subcuenca.

Época Húmeda:

En esta época se consideró el año 1999 en el cual se utilizó la figura 17 del 6 de marzo y del 30 de septiembre de 1999 (Figura 20), debido a que según el análisis climático tiene una

precipitación de 1790mm anuales. A continuación se describe la figura 20, y el gráfico de balance de ocupación de superficie según tipos de cobertura de las respectivas fechas.

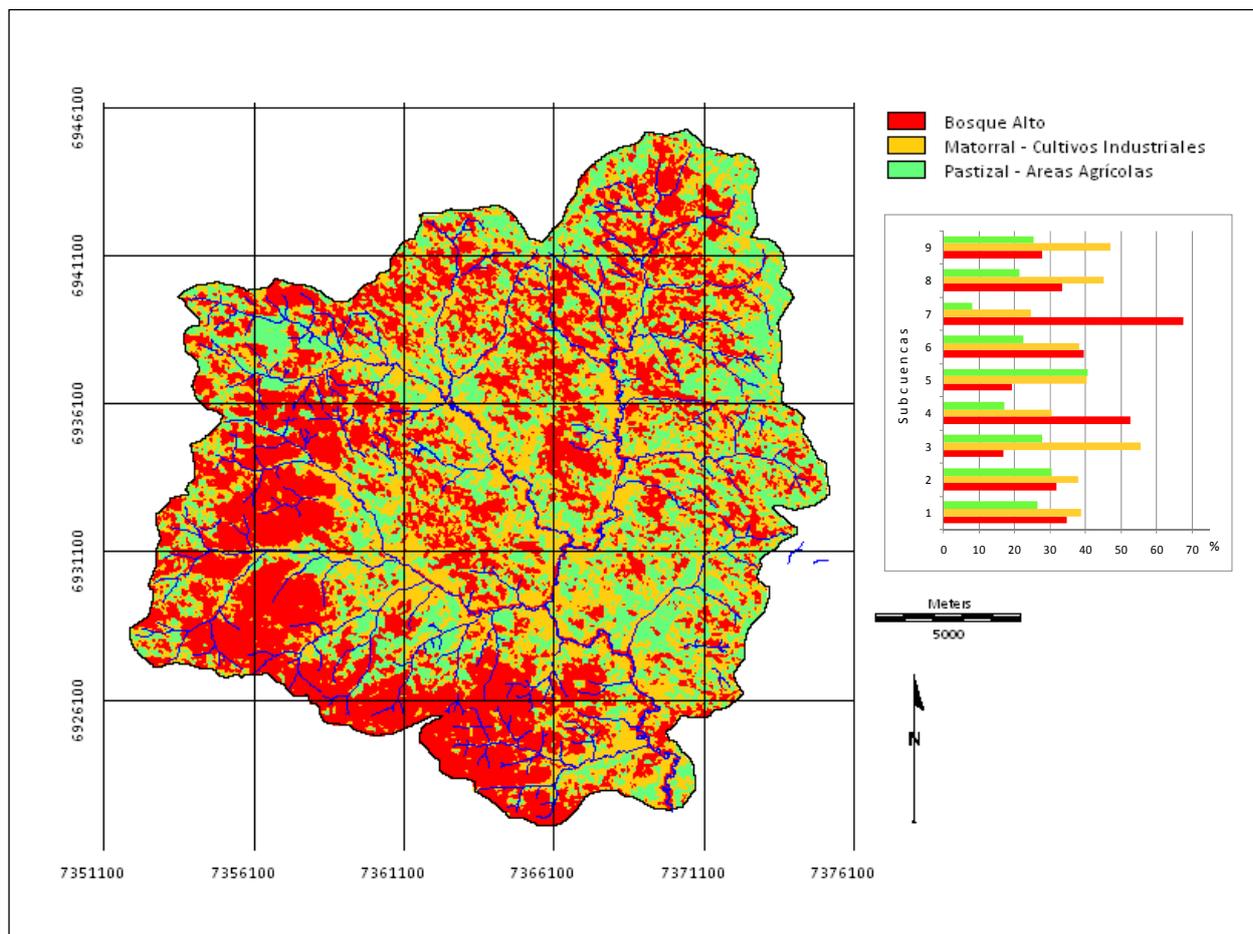


Figura 20: Mapa de cobertura vegetal y uso del suelo para 30 de septiembre de 1999 de la Cuenca del Arroyo Itacaruaré. Representación grafica del % de ocupación por subcuenca.

La figura 20 pertenece a la fecha del 30 de septiembre de 1999, de la Cuenca del Arroyo Itacaruaré. Se observa que la subcuenca 7 tiene una superficie de bosque alto de 67 %. La subcuenca 4 presenta una superficie de 54 %. Las subcuencas 1, 2, 6, 8 y 9 tienen una superficie de bosque alto entre el 20 % y el 50 %; las restantes 3 y 5 una superficie inferior al 20 %.

Los matorrales o cultivos industriales en la subcuenca 3 tiene una superficie de 55 %; las restantes subcuencas se presentan ocupando una superficie entre el 20 % y 50 %.

Los pastizales y áreas agrícolas se presentan ocupando una superficie entre el 20 % y el 50 % en las subcuencas 1, 2, 3, 5, 6, 8 y 9. Las subcuencas 4 y 7 tienen una superficie inferior al 20 %.

En el gráfico 24 del balance de ocupación de superficie según tipos de cobertura en el año 1999, expresa que el tipo de cobertura fue homogéneo en toda la cuenca durante el año en estudio, presentando pequeños cambios con valores de más o menos 5 %.

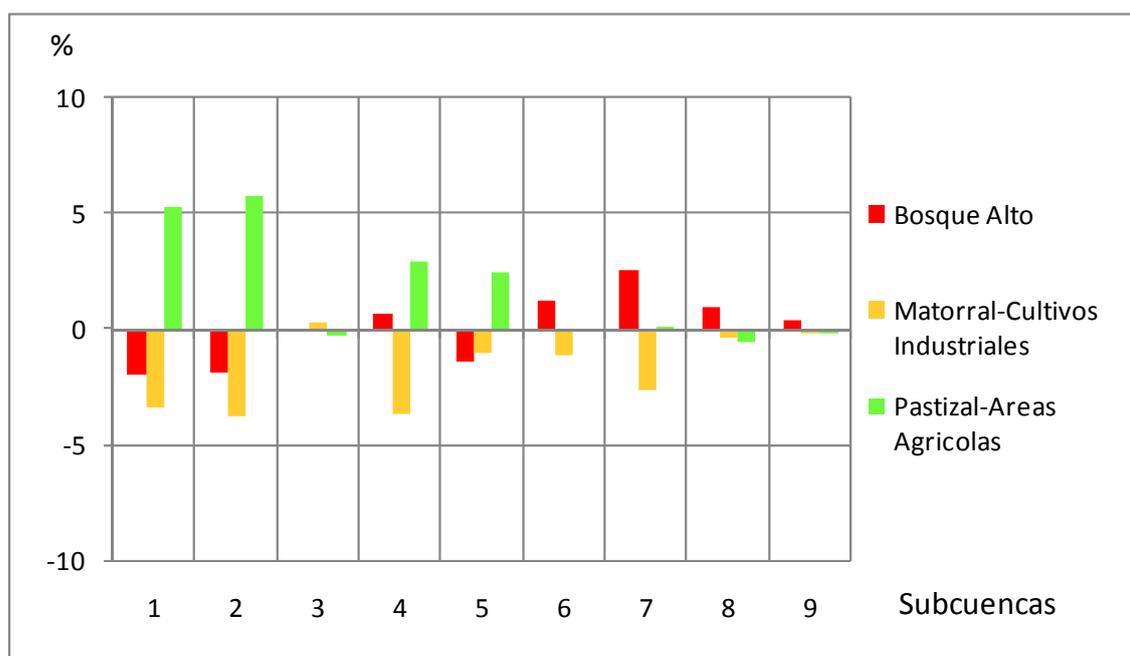


Gráfico 24: Balance de ocupación de superficie según tipos de cobertura entre 6 marzo de 1999 y 30 de septiembre de 1999.

Época de Sequía:

En esta época se considero el año 2004 en el cual se utilizo la figura 18 del 16 de febrero y el 7 de junio de 2004 (Figura 21), con una precipitación anual que alcanzo apenas 1120 mm. A continuación se describe la figura 21, y el gráfico de balance de ocupación de superficie según tipos de cobertura de las respectivas fechas.

En la figura 21 perteneciente al 7 de junio de 2004 de la Cuenca del Arroyo Itacaruaré, se observa que la subcuenca 7 continua ocupando una superficie mayor al 50 % de bosque alto y que las demás subcuencas tienen una superficie de entre el 20 % y 50 % de bosque alto.

La cobertura de matorral o áreas industriales es la que se encuentra más representada en toda la cuenca. Este tipo de cobertura se localiza en una superficie mayor al 50 % en las 3 y 9. Las subcuencas restantes tienen una superficie entre 20 % y 50%.

Los pastizales se presentan con son los que presentan menor superficie de ocupación en las subcuencas. La subcuenca 5 es la que tiene la mayor ocupación con un 28 % de superficie. Las restantes, salvo la 7, se presentan ocupando una superficie entre el 10 % y 20 %, y la subcuenca 7 solo el 5 % de pastizal.

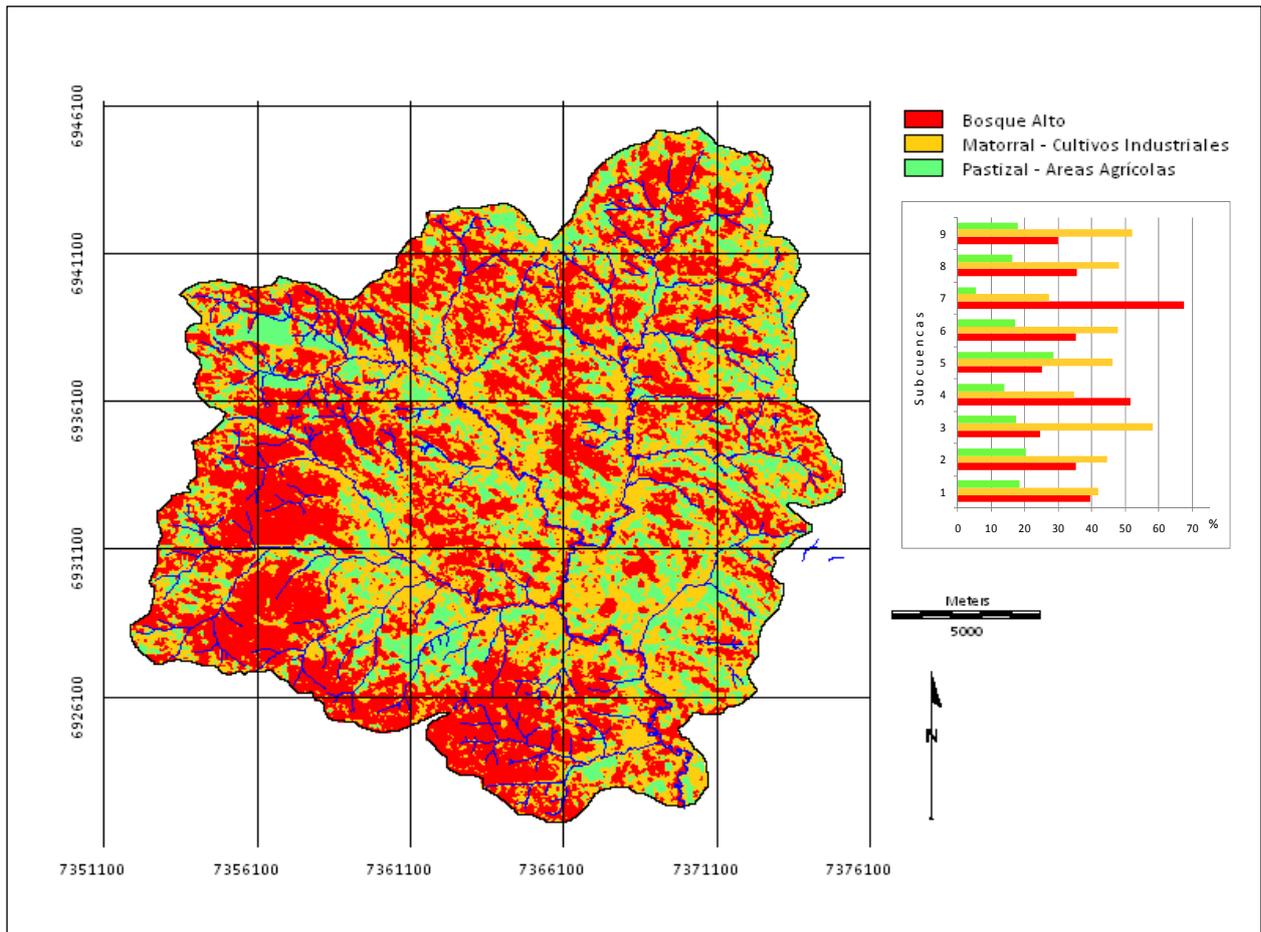


Figura 21: Mapa de cobertura vegetal y uso del suelo para 7 de junio de 2004 de la Cuenca del Arroyo Itacaruaré. Representación grafica del % de ocupación por subcuenca.

En el gráfico 25 del balance de ocupación de superficie según tipos de cobertura en el año 2004, se presentan cambios mayores al 5 % en las subcuencas 1, 2, 4 y 5. Las subcuencas restantes mantienen su tipo de cobertura fue homogéneo durante el año en estudio, Presentando pequeños cambios con valores de más o menos 5 %.

Las subcuencas 1, 4 y 5 presentan un aumento en la superficie de bosque alto, que se puede deber al cambio de categoría de bosques implantados o capueras, de matorrales a la categoría bosque alto. Los matorrales presentan pérdida de superficie, debido al cambio de categoría antes mencionado o la habilitación de tierras para la agricultura.

En la subcuenca 2 se observa pérdida de superficie de bosque alto y de matorrales, y un aumento de la superficie de los pastizales o áreas agrícolas.

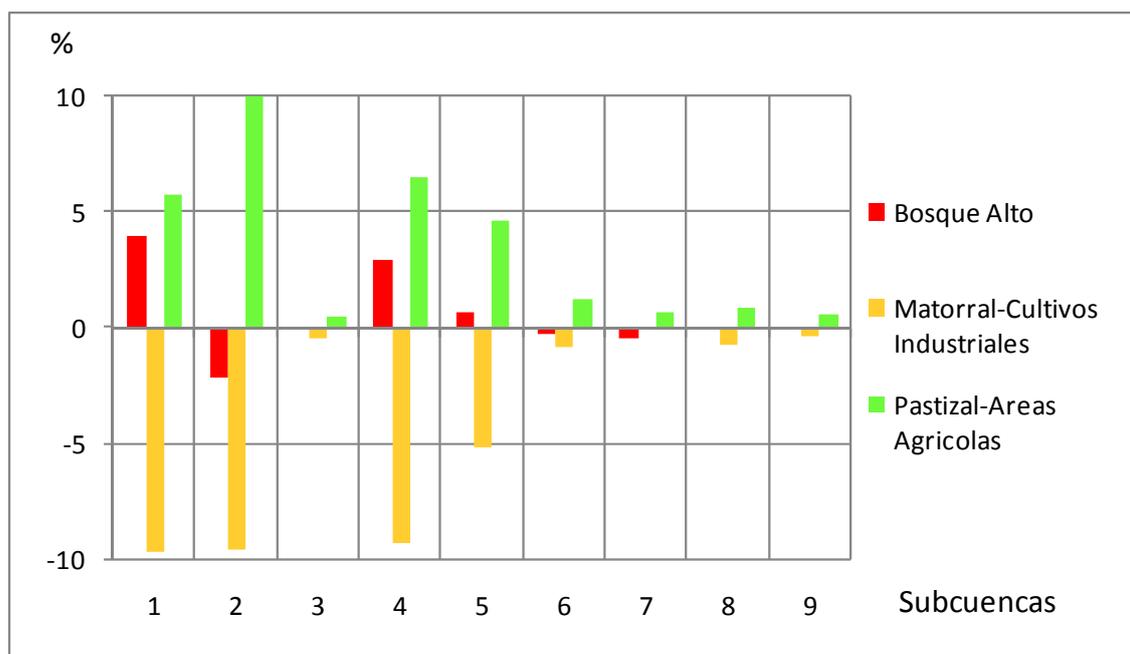


Gráfico 25: Balance de ocupación de superficie según tipos de cobertura entre 16 de febrero y el 7 de junio de 2004.

2.12. Mapa de grupos hidrológicos:

El mapa de grupos hidrológicos se obtuvo por el procesamiento y análisis de los perfiles de suelos anteriormente mencionados a nivel superficial, utilizando el programa Idrisi Andes. Para la definición de los grupos hidrológicos de suelos se utilizaron las clases texturales (USDA) y el diagrama triangular con las curvas de conductividad hidráulica a saturación (López Cadenas de Llano, 1998), que se encuentran representados en la tabla 5.

El análisis particular de cada grupo hidrológico se realizó determinando la clase textural de cada horizonte que compone cada perfil (54 perfiles). Para ello se generó una planilla que automáticamente establecía el grupo hidrológico según el diagrama triangular para la determinación de textura (Clasificación USDA) (López Cadenas Llano 1998).

Los datos incorporados a la planilla de cada horizonte del perfil fueron porcentaje de arena, limo y arcilla. Se determinó el grupo hidrológico de cada perfil, con estos datos se obtuvo el GH de cada subgrupo y luego de la unidad cartográfica por medio de un medio de la creación de un comando condicional en el programa Excel.

Como resultado del análisis de las unidades cartográficas de los suelos se obtuvo la tabla 17, que muestra la clasificación y descripción de los grupos hidrológicos.

Unidad Cartográfica	Grupo hidrológico
3	D
4	C
5	C
6a	A
6b	A
9	C

Tabla 17: Clasificación y descripción de los grupos hidrológicos.

Según su comportamiento al escurrimiento de los suelos, expresados en la tabla 17, la Cuenca del Arroyo Itacaruaré se presenta los grupos hidrológicos A, B y C (Figura 22). La interpretación de misma indique que el Grupo hidrológico A se exprese en una superficie de 225,96 km², el GH B, ocupa un 77,87 km² y el GH C se distribuye en 49,20 km².

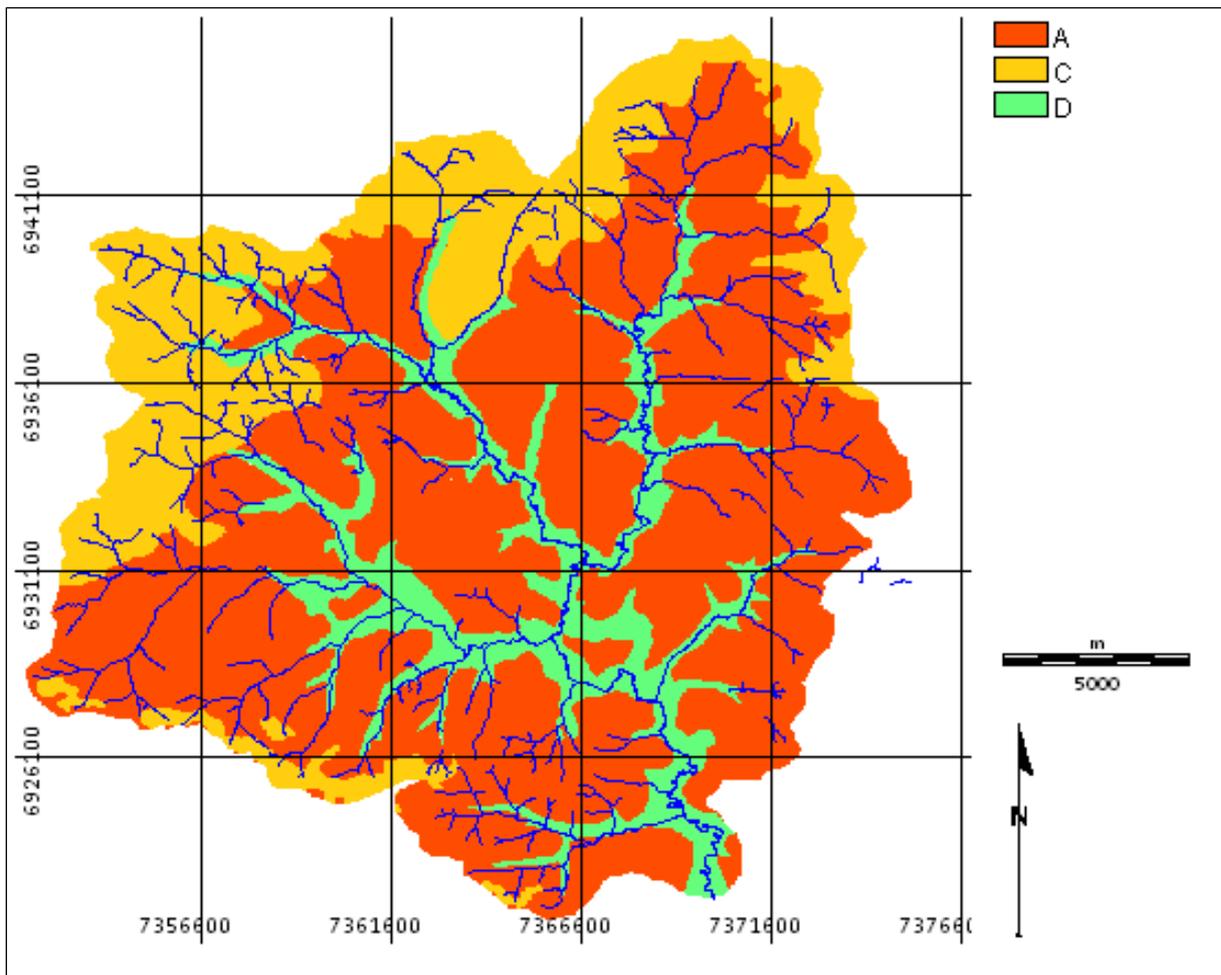


Figura 22: Mapa de grupos hidrológicos de la Cuenca del Arroyo Itacaruaré.

En la tabla 18 se muestra la superficie de los grupos hidrológicos que se presentan en la cuenca y en cada subcuenca.

Subcuencas	Grupo hidrológicos			GH Ponderado
	A	C	D	
1	36,99	34,50	10,30	A
2	66,56	21,71	7,62	A
3	1,99	0,00	2,00	D
4	68,34	21,10	14,29	A
5	19,79	0,00	3,50	A
6	7,76	0,00	3,99	A
7	15,80	0,56	2,50	A
8	6,74	0,00	2,81	A
9	1,99	0,00	2,19	D
Cuenca	225,96	77,87	49,20	A

Tabla 18: Superficie de Grupos Hidrológicos de la Cuenca y sus subcuencas del Arroyo Itacaruaré (km²).

Se puede observar que el grupo hidrológico A es el que predomina en la Cuenca del Arroyo Itacaruaré, con excepción de las subcuencas 3 y 9 que pertenecen al grupo hidrológico D, que cuentan con suelo arcillosos profundos presentando mayor impermeabilidad.

2.13. Mapa de CN:

En la cuanto a la cubierta vegetal se establecieron clases según la cubierta vegeta y su relación a las condiciones hidrológicas particulares de cada suelo. Cuanto más denso es el cultivo mejor es su condición hidrológica, siendo menor su número de curva y consecuentemente mayor la infiltración.

La representación cato grafica de la distribución del número de curva de la cuenca del Arroyo Itacaruaré expresa el tipo de movimiento del agua sobre el terreno a nivel superficial. A continuación se presentan los distintos estadios temporales y evolutivos del número de curva en la cuenca del Arroyo Itacaruaré en forma cartográfica, referenciados según la tabla 19.

Tipo de cobertura y uso del suelo	Grupo hidrológicos		
	A	C	D
Bosque alto	25	63	69
Matorral- Cultivos industriales	70	84	88
Pastizales-Áreas Agrícolas	49	79	84

Tabla 19: Caracterización de número de curva según grupo hidrológico y tipo de cobertura y uso del suelo.

El análisis del temporal realizado para los distintos tipos de cobertura vegetal y uso de suelo también se desarrollo para el método del Número de curva por ello la metodología aplicada permitió establecer los siguiente resultados.

- 1) **Estudio interanual:** en las figuras 23, 24 y25 de los años 1999, 2004, 2009, respectivamente se expresan los CN en la Cuenca del Arroyo Itacaruaré.

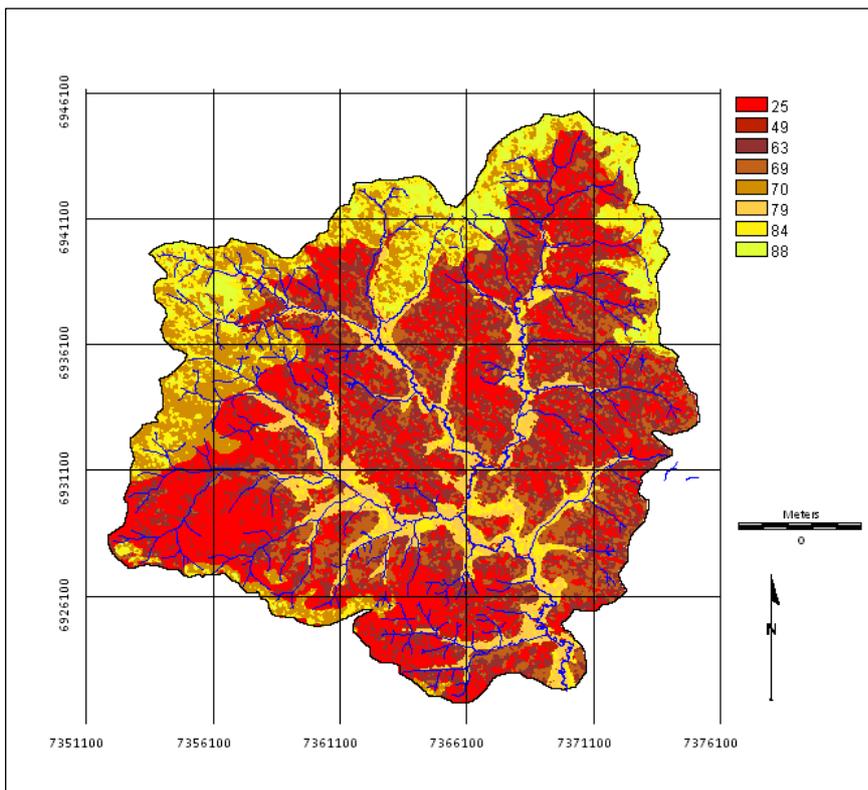


Figura 23: Mapa de Número de curva del 6 de marzo de 1999 de la Cuenca del Arroyo Itacaruaré.

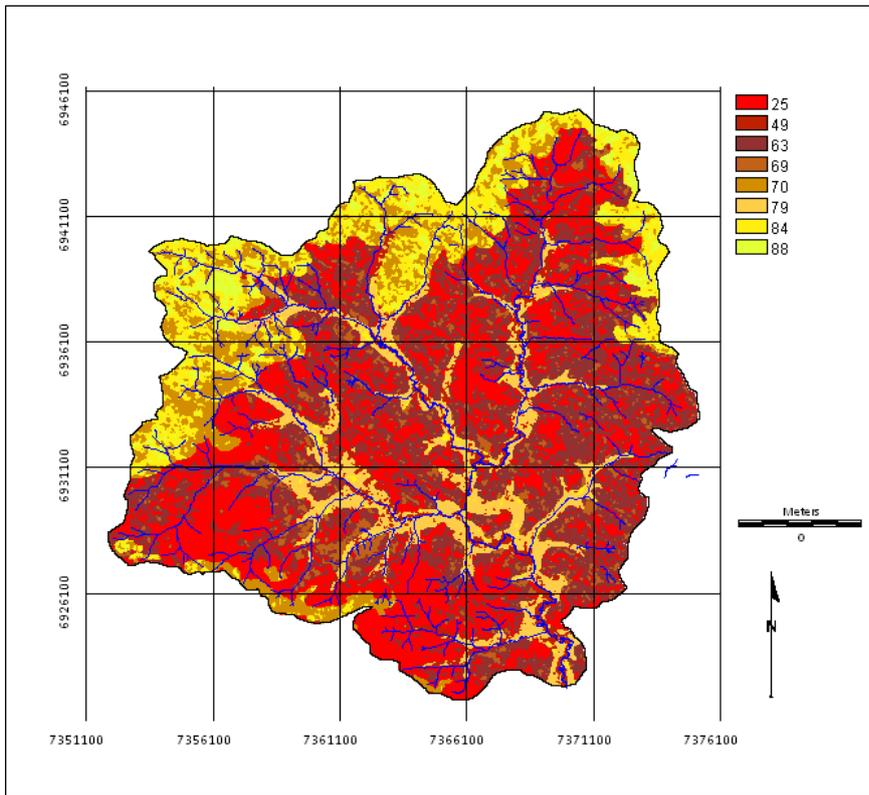


Figura 24: Mapa de Número de curva del 16 de febrero de 2004 de la Cuenca del Arroyo Itacaruaré.

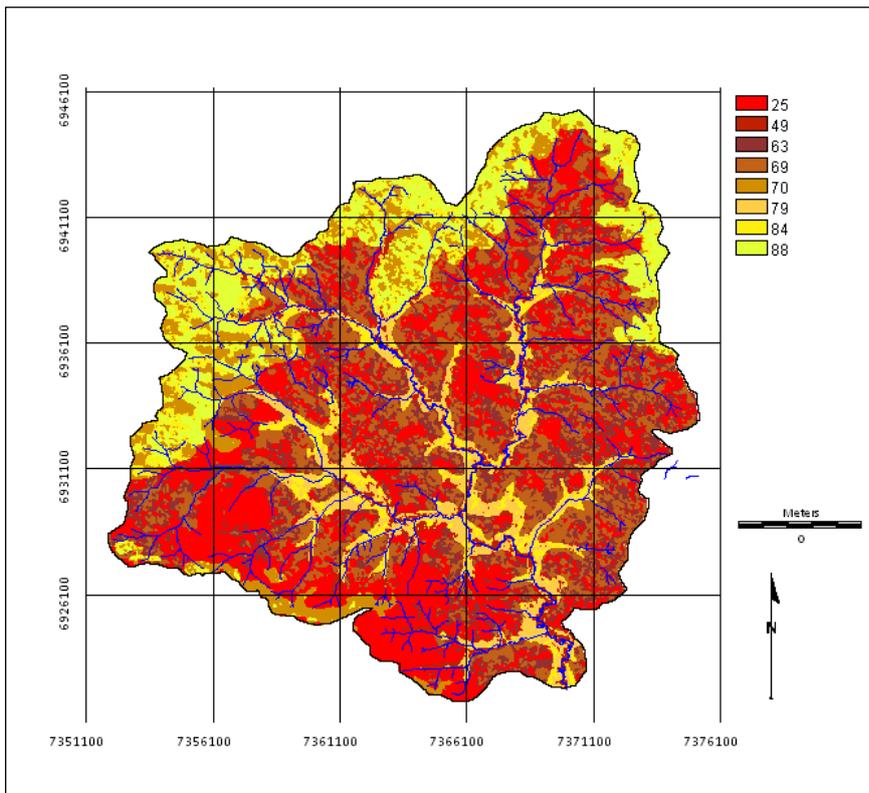


Figura 25: Mapa de Número de curva del 13 de febrero de 2009 de la Cuenca del Arroyo Itacaruaré.

En la tabla 20 se indica el valor del CN ponderado por subcuenca para las tres fechas estudiadas.

Subcuencas	Estudio Interanual		
	06/03/1999	16/02/2004	13/02/2009
1	65	65	68
2	59	57	60
3	67	63	68
4	54	55	56
5	57	57	59
6	59	55	56
7	46	40	41
8	61	55	56
9	67	61	64
Cuenca Ponderado	58	57	59

Tabla 20: Cuantificación del CN ponderado por subcuenca según las distintas fechas. Estudio interanual.

La tabla 20 indica la zonificación por subcuenca según fechas dato que se obtuvo del procesamiento cartográfico geoespacial. Estos resultados expresan cualitativamente las características hidrológicas ya mencionadas en la descripción de la cobertura vegetal y uso del suelo.

- 2) **Estudio intraanual:** en las figuras 23 y 26 expresan el CN según tipo de cobertura vegetal y grupo hidrológico, que se produjeron en el año 1999 considerado época húmeda y en las figuras 24 y 27 el CN para el año 2004 considerado época de sequía. Cabe mencionar que las figura de la fecha 6 de marzo de 1999 y del 16 de febrero de 2004 fueron presentada con anterioridad (Figura 23 y 24 respectivamente)

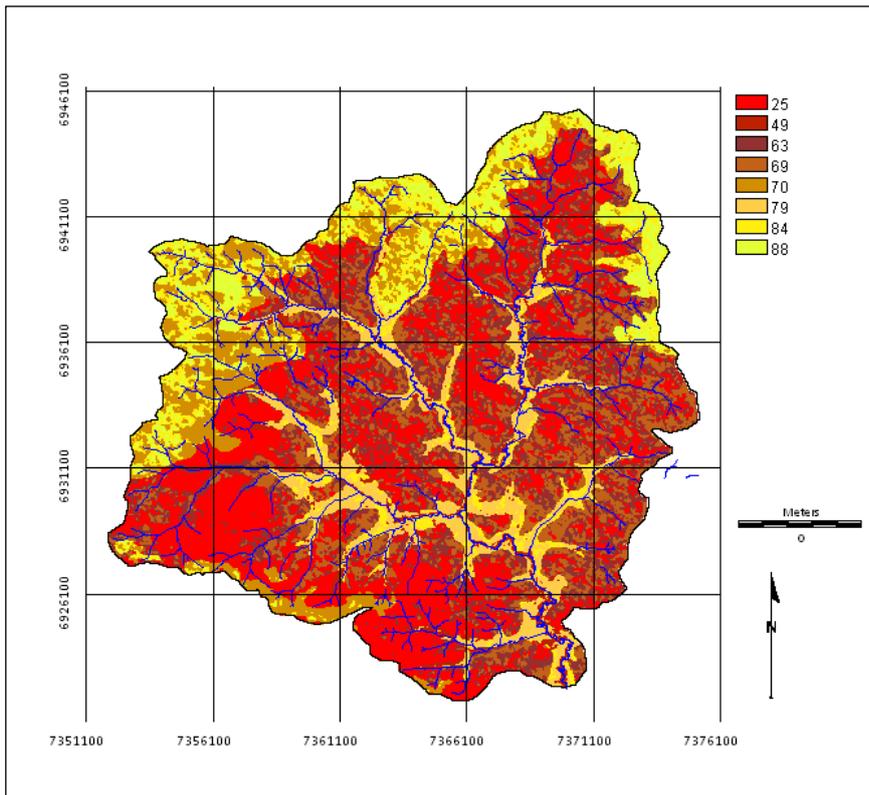


Figura 26: Mapa de Número de curva del 30 de septiembre de 1999 de la Cuenca del Arroyo Itacaruaré.

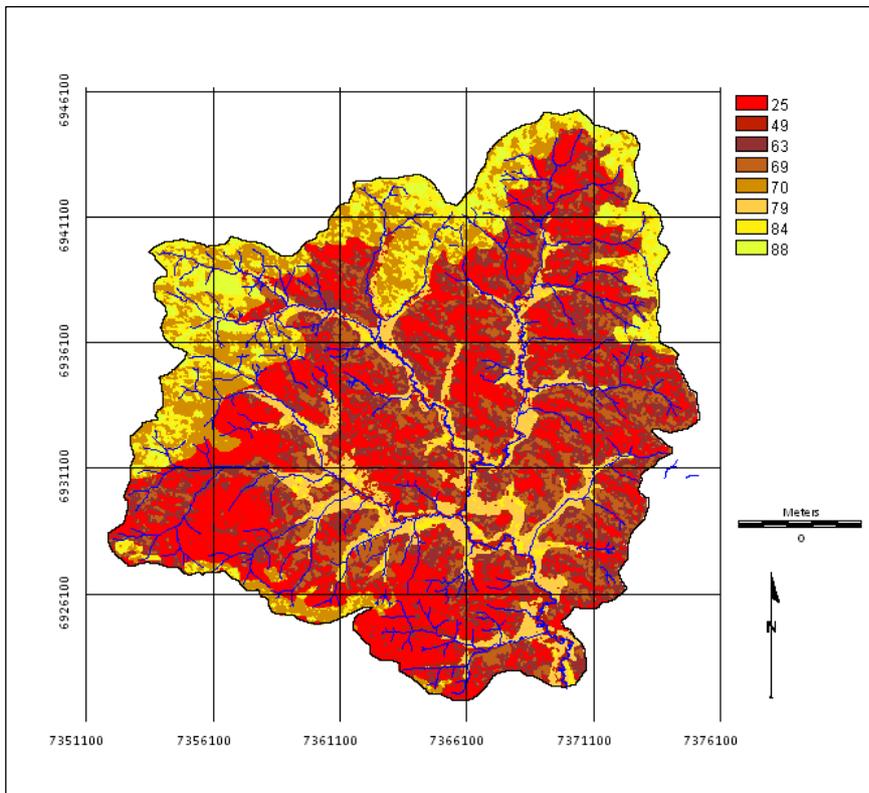


Figura 27: Mapa de Número de curva del 7 de junio de 2004 de la Cuenca del Arroyo Itacaruaré.

A continuación se presenta la tabla 21 que muestra los valores de CN particulares según sus fechas por subcuencas.

Subcuencas	Época Húmeda		Época Seca	
	06/03/1999	30/09/1999	16/02/2004	07/06/2004
1	65	66	65	65
2	59	60	57	58
3	67	67	63	63
4	54	54	55	54
5	57	60	57	58
6	59	55	55	57
7	46	42	40	41
8	61	57	55	56
9	67	64	61	62
Cuenca Ponderado	58	58	57	57

Tabla 21: Cuantificación del CN ponderado por subcuenca según las distintas fechas. Estudio intraanual.

En la tabla 21 demuestra que no hay cambios significativos en la valoración del CN ya como se expreso en la cartografía de cobertura vegetal y uso del suelo, los cambios de cobertura solo alcanzaron valores menores al 10%.

3. Índice de Erosión Pluvial (R).

La información básica se adquirió de las fajas pluviográficas diarias que fueron proporcionadas por el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria de la Estación Experimental de Cerro Azul, obtenidas del fluviógrafo instalado en dicha estación, situado en el Municipio Cerro Azul del Departamento L. N. Alem, sobre el límite norte la cuenca del Arroyo Itacaruaré.

El período con fajas pluviográficas abarca desde el 1 de enero del 1987 al 31 de diciembre del 2006, de las cuales se seleccionaron aquellas fajas legibles. Del total de las tormentas identificadas, 701 eran legibles y mayores a 13,5 mm. Estas bandas fueron utilizadas para el cálculo de Índice de Erosión Pluvial.

Fecha 07/04/1991				
Tiempo (hs)	Precp acum (mm)	Precp interv (mm)	E ($J \cdot m^{-2} \cdot cm^{-1}$)	Incremento ($J \cdot m^2 \cdot hs^{-1}$)
0,5	1,94	1,94	146,81	28,48
0,5	15,83	13,89	222,90	309,61
0,5	17,22	1,39	133,93	18,62
0,5	19,33	2,11	150,06	31,66
0,5	21,11	1,78	143,49	25,54
0,5	22,78	1,67	141,02	23,55
0,5	23,06	0,28	72,00	2,02
0,5	23,06	0,00	0,00	0,00
0,5	23,06	0,00	0,00	0,00
0,5	24,06	1,00	121,20	12,12
0,5	24,06	0,00	0,00	0,00
0,5	24,06	0,00	0,00	0,00
0,5	24,06	0,00	0,00	0,00
0,5	29,45	5,39	186,31	100,42
0,5	33,28	3,83	173,10	66,30
0,5	33,34	0,06	12,46	0,07
8,00		33,34		618,39

Tabla 22: Modelo de planilla para el cálculo de la energía cinética (E) por tormenta y su incremento.

Con los datos obtenidos de la lectura de la faja pluviográfica de cada tormenta, se confeccionó una planilla modelo, para el cálculo de la intensidad, la energía cinética y el incremental por intervalo de tiempo por cada tormenta obteniendo por sumatoria el incremento de la tormenta. (Tabla 22).

Se hizo un análisis de regresión entre la precipitación de cada tormenta y la intensidad media obteniendo distintas ecuaciones de ajuste, como ser: de tipo lineal, exponencial, polinómica, potencial y logarítmica. El gráfico 26, corresponde al análisis de correlación logarítmica, que generó el mejor ajuste entre la precipitación total de una tormenta y su intensidad media. Se observa que la ecuación presenta un coeficiente de correlación de 0,31, un R^2 de 13,14 % y un error estándar de 25,02.

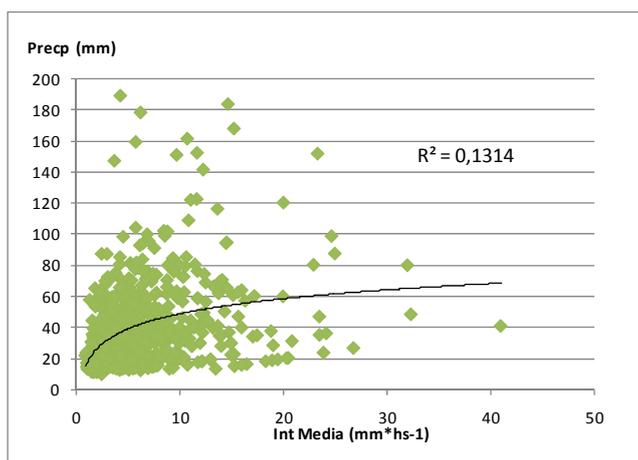


Gráfico 26: Correlación logarítmica entre Precipitación de la tormenta (mm) e Intensidad Media ($\text{mm} \cdot \text{hs}^{-1}$).

A partir de estos resultados se consideró obtener una mejor correlación entre las variables precipitación de cada tormenta e intensidad máxima en 30 minutos (I_{30}). Este permitió obtener la relación existente entre las variables gráfico 27.

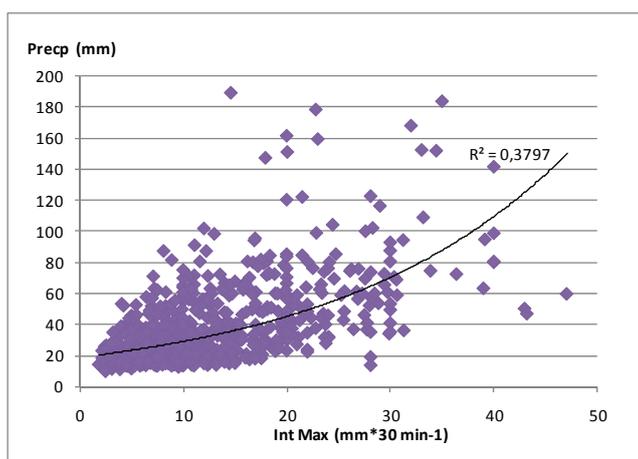


Gráfico 27: Correlación lineal entre Precipitación de la tormenta (mm) e Intensidad Max ($\text{mm} \cdot 30\text{min}^{-1}$).

El gráfico 27 muestra la correlación entre la precipitación total de la tormenta (mm) y el Intensidad máxima en 30 minutos ($\text{mm} \cdot 30\text{min}^{-1}$), cuyo resultado es una ecuación de tipo exponencial, con un coeficiente de correlación de 0,59, un R^2 de 37,97 y un error estándar de 21,03.

Del procesamiento de los resultados de la tabla 22, se obtuvieron los datos de las distintas variables que para el cálculo del R para cada tormenta, y la caracterización de la tormenta, expresando un ejemplo modelo en la tabla 23.

Fecha	Duración (hs)	Precip Total (mm)	Inten Media (mm*hs ⁻¹)	Inten Max (mm*30min ⁻¹)	Incremento Total (J*m ⁻² *hs ⁻¹)	R (J*m ² *cm*hs ⁻¹)
07/04/1991	8,00	33,34	4,16	13,89	6,18	17,18

Tabla 23: Modelo de tabla de resultados de las distintas variables que intervienen en el cálculo del Índice de Erosión Pluvial para cada tormenta.

Con la aplicación de la metodología y los datos expuestos en las tablas 22 y 23, se obtuvo el Índice Erosión Pluvial (R) para las 701 tormentas. De los sumatoria de los Índice de Erosión Pluvial por tormenta permitieron establecer el Índice de Erosión Pluvial anual para el período 1987 - 2006. También se calculó el Índice de Erosión Pluvial mensual para el período en estudio, para identificar la agresividad climática temporal con respecto a las características de las precipitaciones.

Se estableció una comparación entre las precipitaciones totales anuales y el R anual, de los años 1967-2006 (Gráfico 28), lográndose observar que la tendencia de las precipitaciones es levemente positiva. Analizando paralelamente las precipitaciones anuales con el índice de erosión pluvial, se percibe que ambas se acompañan en la mayoría de los años.

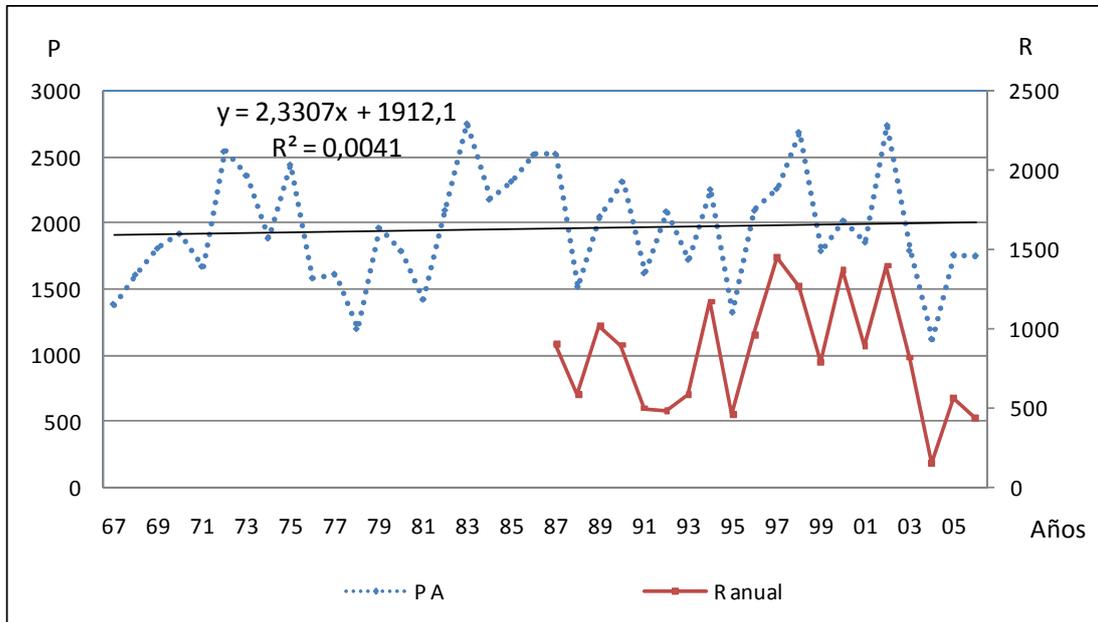


Gráfico 28: Comparación de las precipitaciones anuales (PA) (mm) con Índice de Erosión Pluvial Anual (R) (J*m⁻²*cm*hs⁻¹) (1967-2006).

En el gráfico 28, se observa que el año 2004 fue un año atípico en el período de 1967 - 2006, por el ser el que menos precipitación anual presentó.

Haciendo un análisis análogo de las precipitaciones de los años 1987-2006, en los cuales se calculó el Índice de Erosión Pluvial, se observa que las precipitaciones en los últimos 20 años tienen una tendencia a disminuir en coincidencia con una menor disminución del índice de erosión pluvial. Estos resultados permiten concluir que las precipitaciones anuales son menores, pero su torrencialidad se mantiene levemente variable, indicando una actual mayor torrencialidad en las tormentas (Gráfico 29)

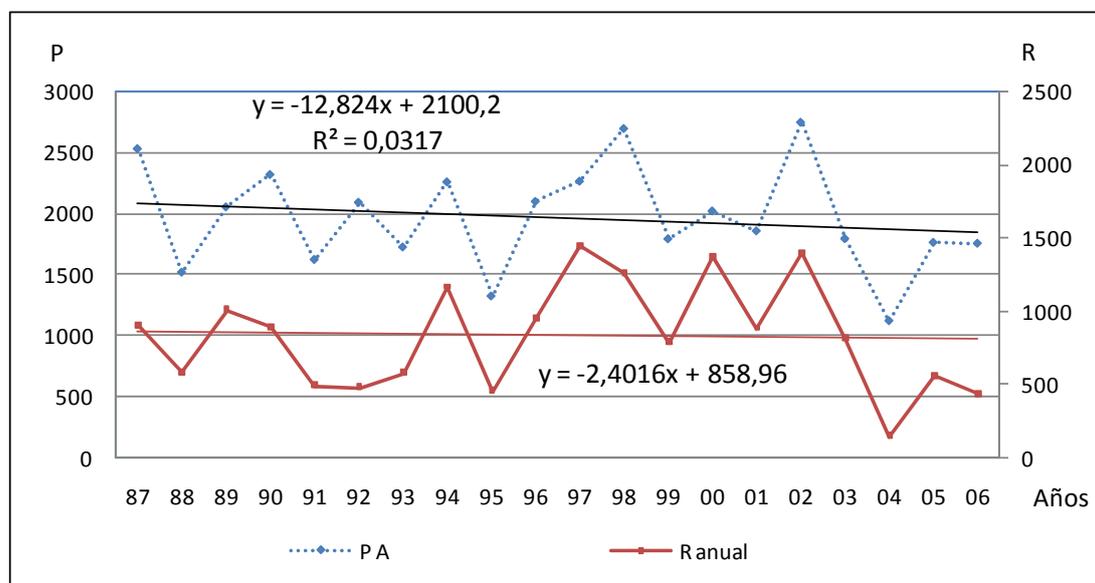


Gráfico 29: Comparación de precipitaciones anuales (PA) (mm) con Índice de Erosión Pluvial Anual (R) ($J \cdot m^{-2} \cdot cm \cdot hs^{-1}$) (1987-2006).

Dada la importancia que presentaron las precipitaciones anuales comparándolas con el índice de erosión pluvial anual, se realizó un estudio con el fin de determinar en qué época del año el índice de erosión pluvial tiene mayor incidencia. Se procedió al cálculo del Índice de Erosión Pluvial mensual, en comparación con las precipitaciones mensuales mayores a 13,5 mm. (Gráfico 30).

Se observa que los meses que presentan mayor precipitación mensual son: octubre (211,00 mm), abril (200,76 mm) y diciembre (189,75 mm) (Gráfico 30), y los que presentan mayor índice de erosión pluvial ($J \cdot m^{-2} \cdot cm \cdot hs^{-1}$), fueron los meses de diciembre (112,05), febrero (108,94), abril (98,68) y octubre (91,17).

También se realizó un análisis mensual de la interrelación de la precipitación mensual y el R mensual, encontrando que las precipitaciones mayores a 13,5 mm a lo largo de los años tenían un comportamiento relacionado con el índice de erosión pluvial.

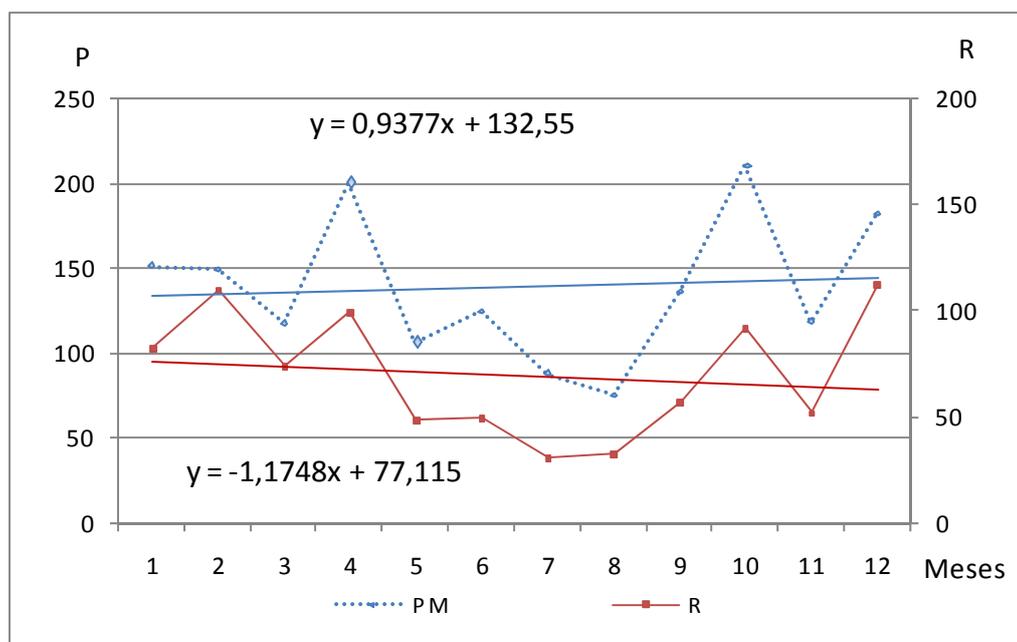


Gráfico 30: Comparación de precipitaciones mensuales (PM) (mayores a 13,5 mm) con Índice de Erosión Pluvial Mensual (R) ($J \cdot m^{-2} \cdot cm \cdot hs^{-1}$) (1987-2006).

Modelo de estimación del R anual para la Cuenca del Arroyo Itacaruaré

Con el objeto de estimar valores de R en la Cuenca del Arroyo Itacaruaré, se efectuó un análisis de regresión para obtener una ecuación que estime el R en función de una variable dependiente que pueda ser fácilmente medida. Las variables meteorológicas recomendadas son: cantidad e intensidad media de la tormenta.

El análisis para la estimación del Índice de Erosión Pluvial anual, se utilizó el programa excel Microsoft office. Se realizó el análisis de las precipitaciones anuales versus el índice de erosión pluvial para los años 1987-2006, con los datos expresados en la tabla 24. El R Anual Promedio calculado a partir de los datos de la tabla 24 alcanza un valor de 833,74 ($J \cdot m^{-2} \cdot cm \cdot hs^{-1}$).

Años	Precip Anual (mm)	R Anual ($J \cdot m^{-2} \cdot cm \cdot hs^{-1}$)
1987	2527,4	904,6
1988	1517,5	587,0
1989	2051,6	1012,9
1990	2316,2	895,8

Tabla 24: Datos de precipitaciones anuales e Índice de Erosión Pluvial anual del período 1987-2006.

Años	Precip Anual (mm)	R Anual (J*m ⁻² *cm*hs ⁻¹)
1991	1621,2	496,0
1992	2088,7	480,9
1993	1723,4	584,3
1994	2256,4	1171,0
1995	1322,7	457,3
1996	2096,0	955,8
1997	2261,5	1450,7
1998	2692,4	1266,5
1999	1790,2	791,0
2000	2018,4	1371,3
2001	1855,3	887,5
2002	2744,0	1398,9
2003	1792,3	816,0
2004	1120,8	148,6
2005	1761,4	560,7
2006	1754,3	437,9

Tabla 4: Datos de precipitaciones anuales e Índice de Erosión Pluvial anual del período 1987-2006. Continuación.

Se realizó el gráfico de dispersión entre las precipitaciones totales anuales y el R anual, dando como resultado un modelo de tipo logarítmico (Gráfico 31).

El modelo matemático obtenido del análisis (Gráfico 31) se expresa en la fórmula 22, con un coeficiente de correlación de 0,799, un R² de 64,29 % y un error estándar de 227,835

$$R = -8964 + 1296 * \ln (PA)$$

Fórmula 22: Modelo matemático para la obtención del R anual (R) para la Cuenca del Arroyo Itacaruaré.

Donde

R= Índice de Erosión Pluvial anual (J*m⁻²*cm*hs⁻¹).

P A =Precipitación Anual (mm).

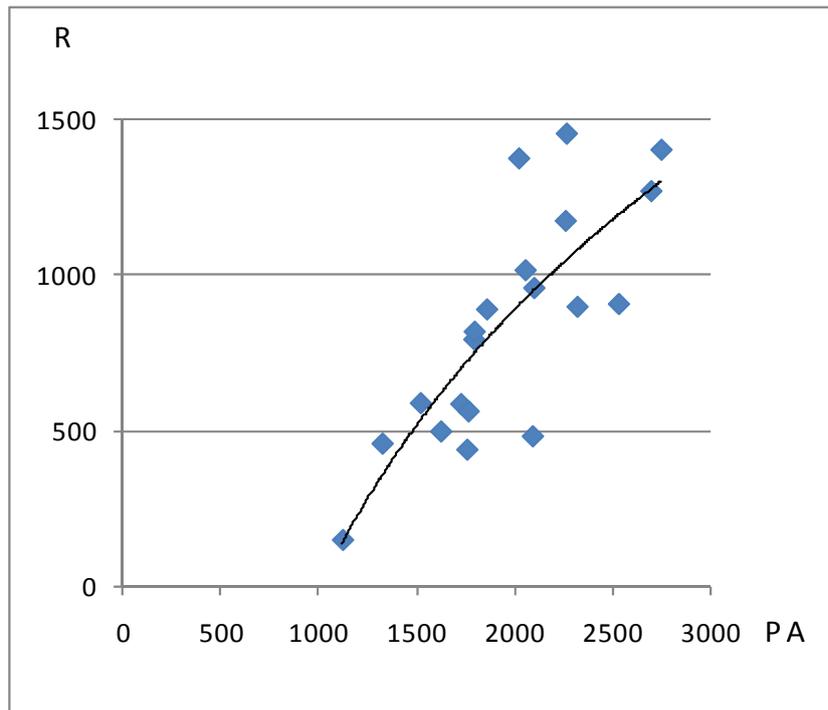


Gráfico 31: Modelo logarítmico entre Precipitación Anual (PA)(mm) e Índice de Erosión Pluvial Anual (R) ($J \cdot m^{-2} \cdot cm \cdot hs^{-1}$).

Se realizó una comparación entre los R calculados según Wischmeier y Smith (1978) y los R estimados con la fórmula 22, expresando su resultado con el gráfico 32. Este análisis respondió a un modelo logarítmico con un coeficiente de correlación de 0,802, un R^2 de 70,13% y un error estándar de 180,5.

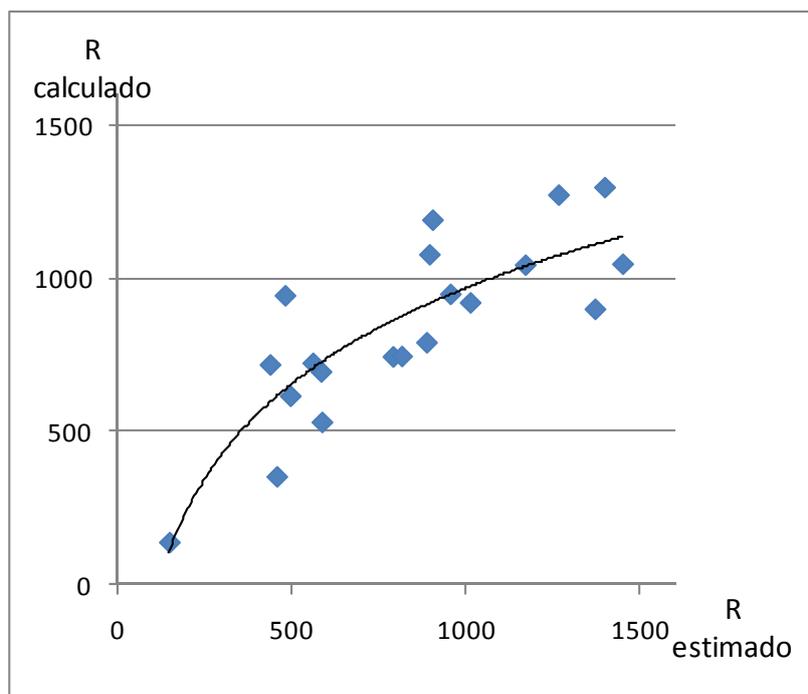


Gráfico 32: Relación entre R estimado versus R calculado ($J \cdot m^{-2} \cdot cm \cdot hs^{-1}$).

Se realizó el análisis del coeficiente de Nash-Sutcliffe dio como resultado el gráfico 33, cuyos estimadores del coeficiente de Nash-Sutcliffe alcanza un valor de 0,642 y un R^2 de 0,642.

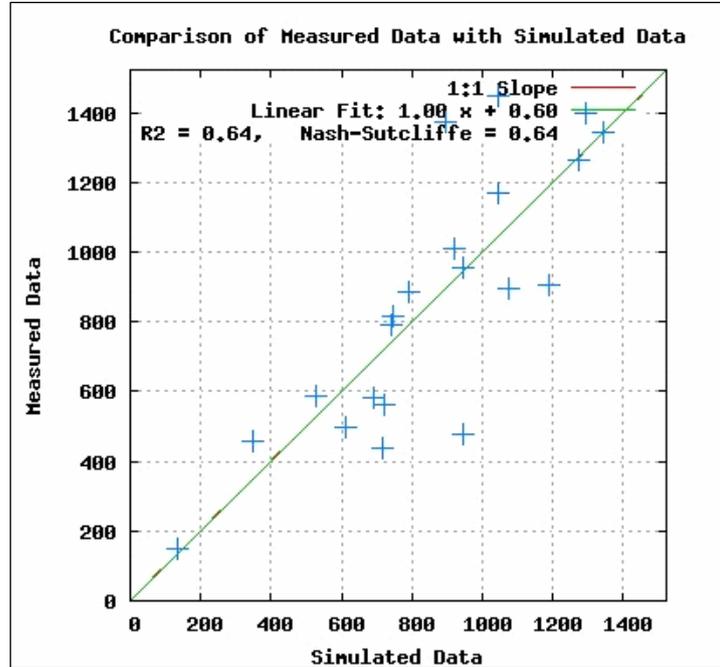


Gráfico 33: Comparación de los R: datos calculados con los estimados mediante el coeficiente de Nash-Sutcliffe.

Modelo de estimación del R mensual para la Cuenca del Arroyo Itacaruaré

A partir de los datos de las 701 bandas pluviográfica se estableció el valor de precipitación mensual consideradas de las sumatoria de las tormentas mayores a 13.5 mm ocurridas en el mes. Se consideraron para el análisis los meses que contenían más del 80% de bandas legibles por tormenta individual. Se realizó la correlación entre valores de precipitación mensual y el R mensual obtenido por la ecuación de Wischmeier y Smith (1978) (W & S).

La ecuación del modelo matemático generado permitió obtener un R estimado, cuyo R^2 fue variable según el mes analizado. Estos resultados se presentan en la tabla 25.

La modelización matemática expresó un buen ajuste a nivel mensual con excepción del mes de enero y junio, el resto de los meses la correlación comprobó que existe una relación entre la precipitación y la erosionabilidad de la lluvias (Tabla 25). En el caso de los meses de los meses de enero y junio presentaron un ajuste menor al 70% de R^2 , debido a la presencia de tormentas inusuales que se produjeron. Estas tormentas identificadas presentan un alto I_{30} , incrementando el índice de Erosión pluvial mensual en el año 1987 y 2003 en el mes de enero y en el año 1991 en el mes de junio, con valores alcanzados de Índice de Erosión Pluvial ($J \cdot m^{-2} \cdot cm \cdot hs^{-1}$) de 122,8, 133,3 y 147,1 y valores de I_{30} ($mm \cdot hs^{-1}$), de 30,0, 31,3 y 40 respectivamente.

Mes	Precip media (>13,5 mm)	R W&S	R estimado	Modelo Matemático	R ²
Enero	158,6	112,2	112,2	$y = 0,7443x - 5,8621$	0,540
Febrero	170,5	164,1	171,1	$y = 1,2577x - 43,275$	0,851
Marzo	112,6	81,1	76,4	$y = 0,2227x^{1,2243}$	0,788
Abril	183,3	124,5	119,4	$y = 0,0658x^{1,4227}$	0,856
Mayo	102,4	55,9	49,4	$y = 0,031x^{1,5623}$	0,830
Junio	119,2	51,1	46,4	$y = 0,0413x^{1,4505}$	0,657
Julio	89,9	36,7	36,7	$y = 0,5179x - 9,8733$	0,962
Agosto	78,6	47,4	39,5	$y = 0,025x^{1,6129}$	0,900
Septiembre	134,3	62,6	62,2	$y = 0,0473x^{1,4472}$	0,853
Octubre	186,9	108,1	169,5	$y = 0,0205x^{1,6086}$	0,852
Noviembre	106,6	58,6	58,4	$y = 0,0031x^2 + 0,1084x + 3,3136$	0,880
Diciembre	165,6	158,4	164,2	$y = 0,0976x^{1,423}$	0,941

Tabla 25: Índice de Erosión Pluvial Mensual (R) ($J \cdot m^{-2} \cdot cm \cdot hs^{-1}$), según Wischmeier y Smith (W&S) y R estimado por modelo matemático.

A continuación se presentan los resultados del análisis del coeficiente de Nash-Sutcliffe a nivel mensual (Gráfico 34).

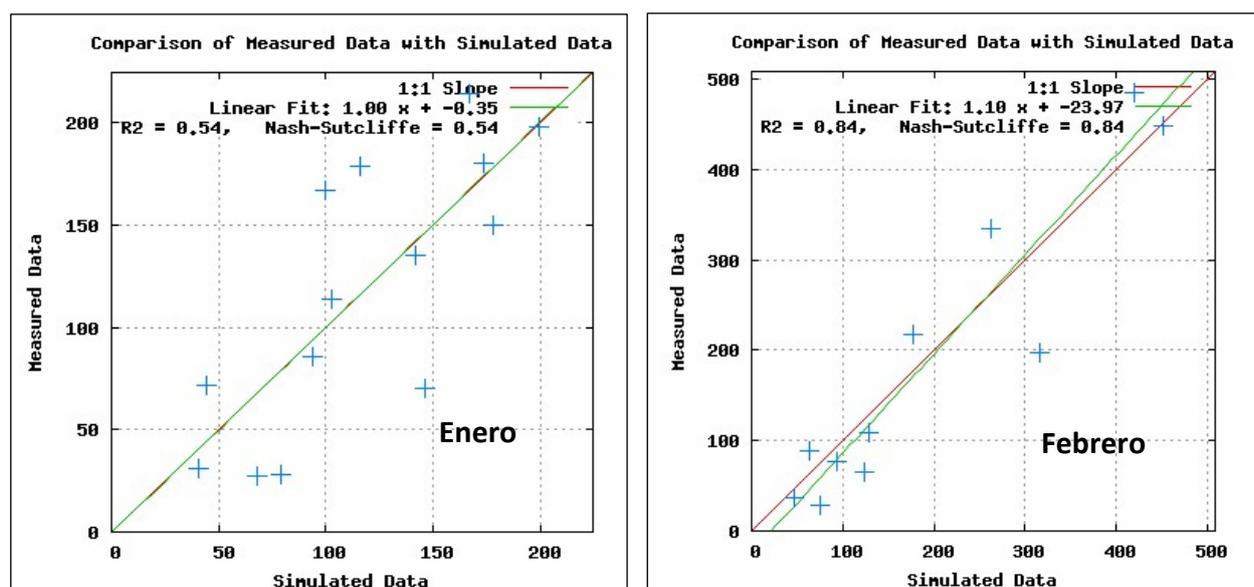


Gráfico 34: Comparación de R calculados con estimados a nivel mensual con el coeficiente de Nash-Sutcliffe.

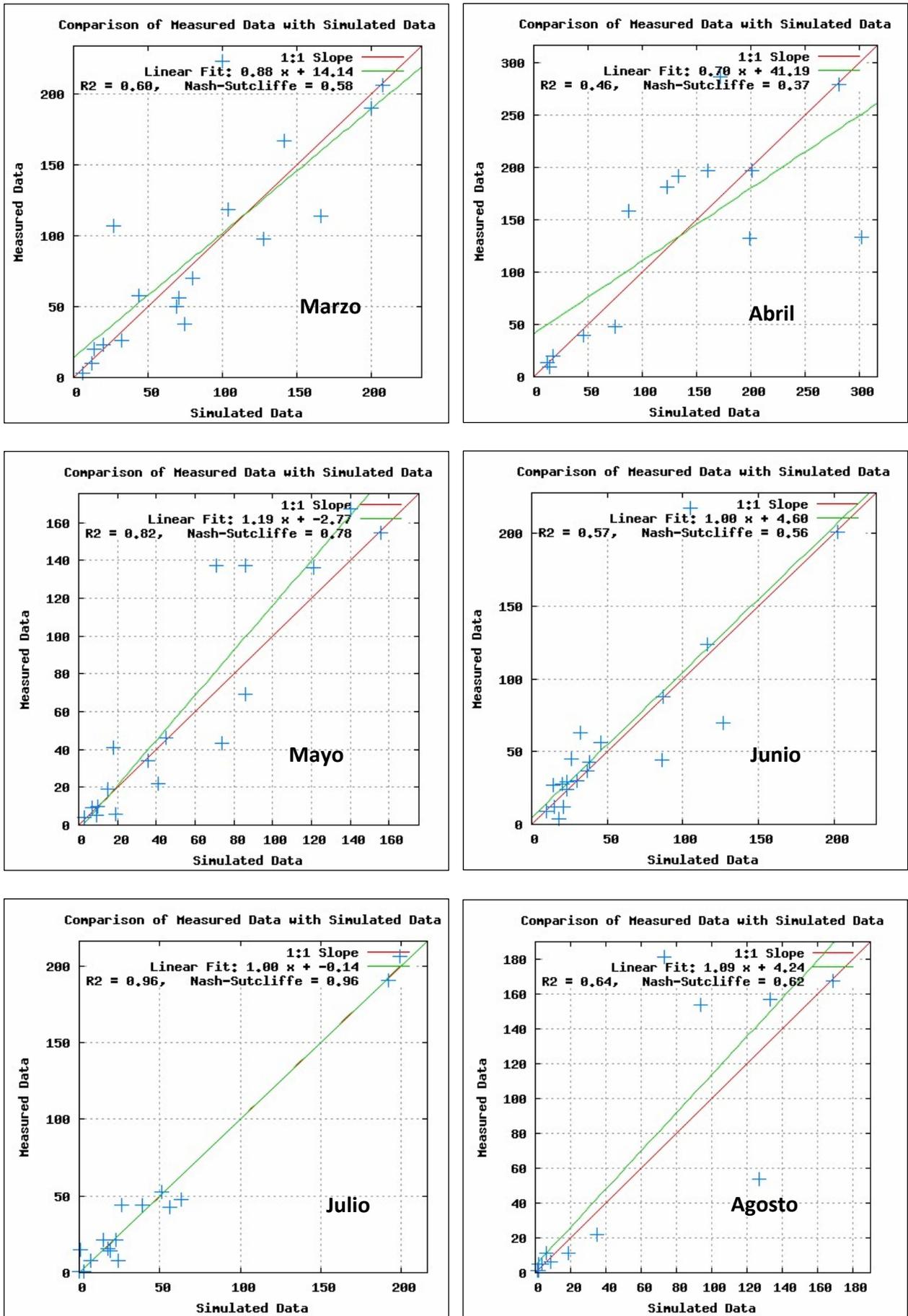


Gráfico 34: Comparación de R calculados con estimados a nivel mensual con el coeficiente de Nash-Sutcliffe. Continuación.

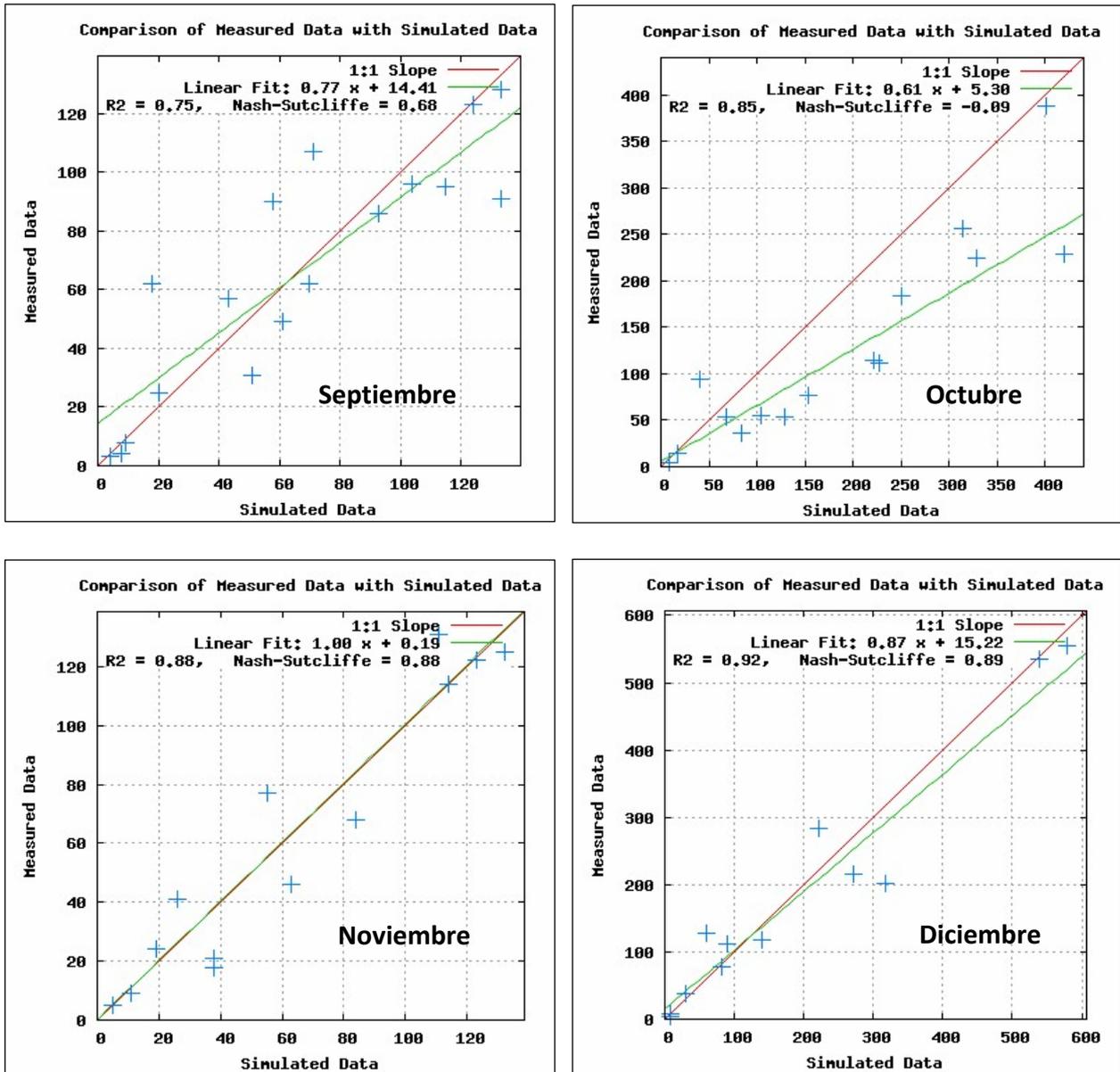


Gráfico 34: Comparación de de R calculados con estimados a nivel mensual con el coeficiente de Nash-Sutcliffe. Continuación.

Modelo de estimación del R individual para la Cuenca del Arroyo Itacaruaré

Se realizó un análisis de correlación entre todas las tormentas que tenía bandas pluviográficas legibles mayores a 13,5 mm y el Índice de Erosión Pluvial que resulto del cálculo mediante la ecuación de Wischmeier y Smith (1978). Se analizó con el programa Statgraphics dando una ecuación de tipo regresión lineal logarítmica, fórmula 23, con un coeficiente de correlación de 0,84, un R^2 de 71,61% y un error estándar de 0,27827.

$$\text{Log}R = -1,63505 + 1,79294 * (\text{Log} \text{Pr ecip})$$

Fórmula 23: Modelo matemático de regresión lineal logarítmica del R para la cuenca del Arroyo Itacaruaré.

Donde:

R: Índice de erosión Pluvial ($\text{J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{cm} \cdot \text{hs}^{-1}$)

Precip: Precipitación de cada tormenta (mm)

Se ha realizado un análisis de puntos residuales inusuales que afectaron al ajuste del modelo, los cuales fueron separados y se analizaron los datos restantes nuevamente realizando una regresión de tipo lineal.

Como resultado del análisis se obtuvo la fórmula 24, con un coeficiente de correlación de 0,86, un R^2 de 74,30 % y un error estándar de 0,2599.

$$\text{Log}R = -1,6069 + 1,78041 * (\text{Log} \text{Pr ecip})$$

Fórmula 24: Modelo matemático de regresión lineal logarítmica del R para la Cuenca del Arroyo Itacaruaré.

Donde:

R: Índice de erosión Pluvial ($\text{J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{cm} \cdot \text{hs}^{-1}$)

Precip: Precipitación de cada tormenta (mm)

Se realizó el gráfico de dispersión con los datos utilizados y resultados de la aplicación de la fórmula 24, expresada en el (Gráfico 35).

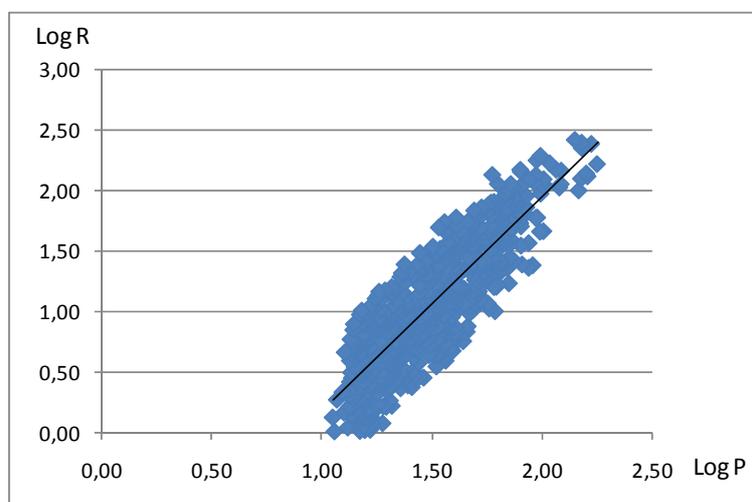


Gráfico 35: Modelo regresión lineal logarítmica entre Precipitación de cada tormenta e Índice de Erosión pluvial.

La comparación entre los R calculados según Wischmeier y Smith (1978) y los R estimados con la fórmula 24 se expresa en el gráfico 36.

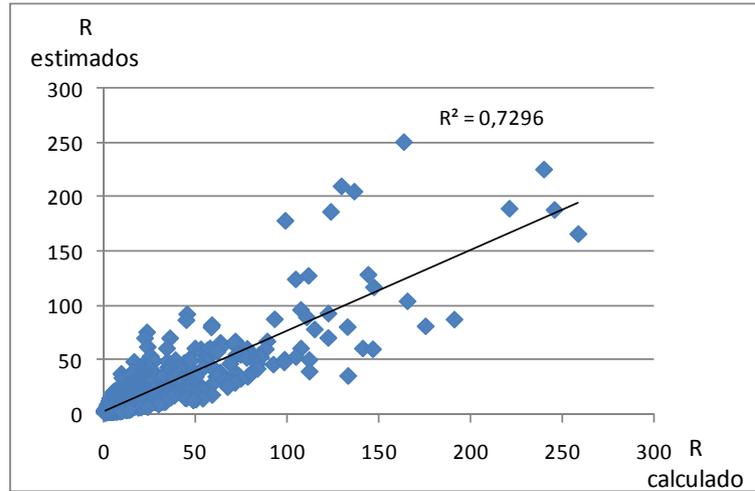


Gráfico 36: R calculados según Wischmeier y Smith (1978) en relación a R estimados por el modelo.

El análisis con el método del coeficiente de Nash-Sutcliffe dio como resultado el gráfico 37, con un coeficiente de Nash -Sutcliffe de 0,729 y un R^2 de 0,722.

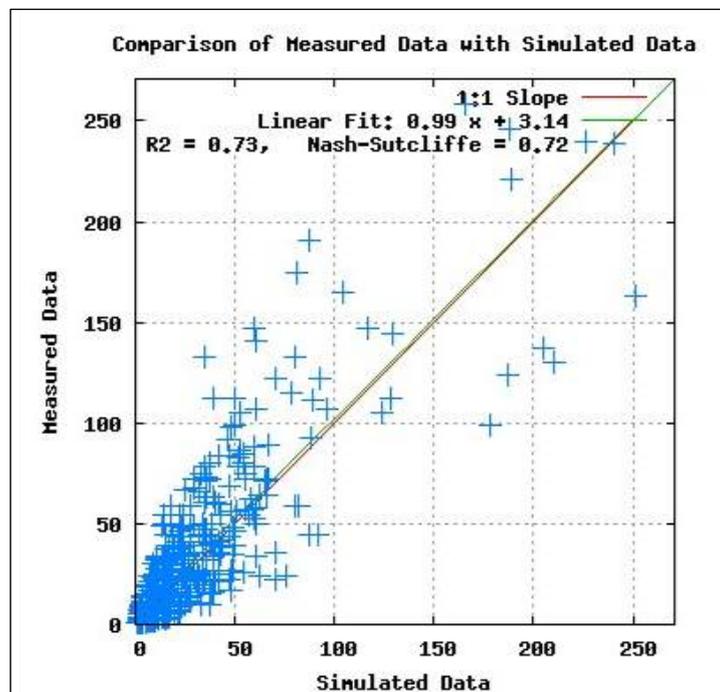


Gráfico 37: Comparación de los R calculados con los estimados mediante el coeficiente de Nash-Sutcliffe

4. Determinación del Índice de Erodabilidad del suelo (K)

Se calculó el Índice de Erodabilidad (K) de los suelos con la información obtenida del levantamiento, fotointerpretación y evaluación de los recursos naturales que fue realizado por la provincia de Misiones, según C.A.R.T.A (1964). Las unidades cartográficas de suelo (U.C.S.) que caracterizan la cuenca son: 3, 4, 5, 6A, 6B y 9, con 21 subgrupos, se seleccionaron 54 perfiles (Tabla 26). La zonificación de la U.C.S. se presentó en la figura 15.

U.C.S.	SUBGRUPO	Denominación de perfiles
3	Ortic Hapludent	1-34
	Ochrept	11
	Aquic Dystrochrept	53
	Eutric Dystrochrept	56
	Ortic Haplaquoll	70
	Ortic Hapludoll	3-5-32-72
	Ortic Argudoll	73
	Ortic Ochraqualf	24-35
	Umbric Ochraqualf	71
	Orthic Typudalf	44
Aquic Typochrult	9	
4	Lithic Hapludent	60
	Umbrandept	61-63
	Orthic Argudoll	59-62
	Orthic Hapludoll	13
6	Umbrandet	4-6-7-9-15-19-27-40-42-48-51-52-58
	Andeptic Hapludoll	33-47-54-57-64
	Orthic Dystrochrept	65-66
9	Orthic Rhodochrult	8-10-14-16-20-26-36-37-41-43-49-68

Tabla 26: Unidades cartográficas, subgrupo y denominación de perfiles de la Cuenca del Arroyo Itacaruaré.

Para cada U.C.S. se realizó el análisis de los perfiles de las variables representativas según las propiedades físicas y químicas para su posterior cálculo del valor de K ponderado.

Las variables físicas consideradas fueron porcentaje de arena, de limo y de arcilla para determinar textura y estructura. Para las propiedades químicas se cuantificó el porcentaje de materia orgánica hasta una profundidad de 30 cm.

La primera etapa consistió en la carga de los datos de cada uno de los perfiles en una planilla de Excel. A partir de estos se calculó la media de los perfiles obteniéndose un valor por subgrupo (Tabla 27).

U.C.S.	Subgrupo	Profundidad cm	Arena %	Limo %	Arcilla %	Mat. Org. %	Cálculo de M
3	Ortic Hapludent	41	38,80	34,75	26,46	3,39	5.411,67
	Ochrept	28	24,55	24,70	50,75	3,65	2.439,63
	Aquic Dystrochrept	48	62,74	22,65	14,61	4,89	7.330,51
	Eutric Dytrochrept	42	51,68	31,22	17,10	2,81	6.909,62
	Ortic Haplaquoll	30	34,65	25,72	39,64	10,46	3.905,24
	Ortic Hapludol	38	44,43	23,79	31,79	4,48	4.845,85
	Orthic Argudoll	55	45,26	30,57	24,17	5,54	5.828,14
	Orthic Ochraqualf	36	48,84	31,19	19,98	3,68	6.443,82
	Umbri Ochraqualf	0	30,92	43,78	25,31	3,41	5.585,15
	Orthic Typudalf	30	51,03	30,19	14,79	7,31	6.917,32
	Aquic Typochrult	37	51,89	30,98	18,14	7,16	6.783,71
4	Lithic Hapludent	15	62,28	16,87	20,85	7,66	6.264,72
	Umbrandept	46	64,60	22,22	13,19	11,09	7.625,50
	Orthic Argudoll	39	30,91	27,63	41,46	6,655	3.590,37
	Orthic Hapludoll	30	55,45	25,00	19,55	4,66	6.473,53
6a	Umbrandept	33	63,55	23,61	12,75	6,26	7.644,68
	Orthic Dystrochrept	32	46,93	23,69	29,38	7,20	5.107,79
	Andeptic Hapludoll	35	57,44	26,31	16,26	7,45	7.093,16
6b	Umbrandept	43	64,20	22,13	13,67	7,99	6.936,33
	Andeptic Hapludoll	35	59,68	24,84	15,49	6,32	7.173,88
9	Orthic Rhodochrult	38	39,27	24,98	36,44	3,05	4.371,26

Tabla 27: Descripción textural por subgrupo de unidad cartográfica de suelo en la Cuenca del Arroyo Itacaruaré.

Resumiendo y ponderando la tabla 27, se generó para cada unidad cartográfica, la tabla 28 donde se muestra el valor de cada variable para el cálculo de M por unidad cartográfica.

U.C.S.	Arena %	Limo %	Arcilla %	Mat. Org %	Cálculo de M
3	44,07	29,96	25,70	5,16	5.672,79
4	53,31	22,93	23,76	7,52	5.988,53
5	39,27	24,98	36,44	3,05	4.371,26
6A	55,97	24,54	19,46	6,97	6.615,21
6B	61,94	23,48	14,58	7,15	7.055,10
9	39,27	24,98	36,44	3,05	4.371,26

Tabla 28: Determinación del M por unidad cartográfica de suelo.

La variable **a** (porcentaje de materia orgánica) se calculó con la tabla 27, presentando sus resultados en la tabla 28.

Para el cálculo de la variable **b** correspondiente a la estructura del suelo se utilizó la metodología mencionada en materiales y métodos.

Debido a las características presentadas por los distintos horizontes de los subgrupos de la Cuenca del Arroyo Itacaruaré, se confeccionó una tabla para la clasificación de las estructuras según los subgrupos de cada unidad cartográfica, presentada en la tabla 29. Mediante esta tabla se determinó la variable física **b** para el cálculo del el Índice de Erodabilidad del suelo (K).

U.C.S.	Subgrupo	Tipo de Estructura	b
3	Ortic Hapludent	Granular, Media y Gruesa	3
	Ochrept	Irregular preponderantemente Poliédrica angular, Media y Menuda / Poliédrica Angular Media y Grosera con tendencia a Prismática	4
	Aquic Dystrochrept	Granular Fina y Media / Poliédrica Subangular Gruesa	4
	Eutric Dytrochrept	Granular Fina y Media / Poliédrica Subangular Media y Gruesa	3
	Ortic Haplaquoll	Poliédrica Subangular Estable / Poliédrica Subangular Media y Gruesa	4
	Ortic Hapludol	Poliédrica Subangular Media y Fina Estable / Poliédrica Subangular Fina y Estable / Prismática Gruesa Estable	4

Tabla 29: Variable **b** por subgrupo de U.C.S.

U.C.S.	Subgrupo	Tipo de Estructura	b
3	Orthic Argudoll	Poliédrica Subangular Media Débil/Poliédrica Subangular Media Moderada con clara tendencia a unirse en prismas/Prismática Media Estable	4
	Orthic Ochraqualf	Granular Media Moderada/Poliédrica Subangular Débil Fina	3
	Umbri Ochraqualf	Granular Media y Gruesa/Poliédrica Subangular Estable	4
	Orthic Typudalf	Poliédrica Subangular Fina Estable/Poliédrica Subangular Media y Gruesa Estable	4
	Aquic Typochrult	Granular Gruesa Moderada/Poliédrica Subangular Gruesa	4
4	Lithic Hapludent	Poliédrica Subangular Media	4
	Umbrandept	Granular Fina Estable/Granular Fina y Media Estable	3
	Orthic Argudoll	Poliédrica Subangular Moderada Media/Poliédrica Subangular Estable Media/Prismática Débil o Moderada Media	4
	Orthic Hapludoll	Granular Media y Menuda/Poliédrica Angular y Subangular Media	3
6a	Umbrandept	Granular Fina y Media/Poliédrica Subangular Media Estable	3
	Orthic Dystrochrept	Granular Fina Estable/ Granular Fina y Media Estable	3
	Andeptic Hapludoll	Granular Media/Poliédrica Media y Gruesa Moderada	3
6b	Umbrandept	Granular Fina y Media/Poliédrica Subangular Media Estable	3
	Andeptic Hapludoll	Granular Media/Poliédrica Media y Gruesa Moderada	3
9	Orthic Rhodochrult	Poliédrica Subangular Media Moderada/Poliédrica Subangular Media y Gruesa Moderada	4

Tabla 29: Variable **b** por subgrupo de U.C.S. Continuación.

Promediando los subgrupos para obtener la variable física **b**, para el cálculo del Índice de Erodabilidad (k) de la Cuenca del Arroyo Itacaruaré se resumió la tabla HH generando la tabla 30.

U.C.S.	b
3	4
4	3
6A	3
6B	3
9	4

Tabla 30: Variable b por unidad cartográfica de suelo.

La variable física **c**, clases de permeabilidad del perfil se realizó según la siguiente codificación del USDA- Soil Survey Manual mencionada en materiales y métodos. Esta clasificación se generó con la información obtenida del primer horizonte de cada subgrupo, cuyo resultados se expresa en la tabla 31.

U.C.S.	Subgrupo	Permeabilidad	c
3	Ortic Hapludent	Libre	2
	Ochrept	Lento/Impedido	5
	Aquic Dystrochrept	Fácil	2
	Eutric Dytrochrept	Libre	2
	Ortic Haplaquoll	Libre	2
	Ortic Hapludol	Libre/Un poco lento	2
	Orthic Argudoll	Libre	2
	Orthic Ochraqualf	Libre	2
	Umbri Ochraqualf	Libre	2
	Orthic Typudalf	Libre/Fácil	2
	Aquic Typochrult	Fácil	2
4	Lithic Hapludent	Libre	2
	Umbrandept	Libre	2
	Orthic Argudoll	Libre	2
	Orthic Hapludoll	Libre	2
6a	Umbrandept	Fácil	2
	Orthic Dystrochrept	Libre	2
	Andeptic Hapludoll	Libre	2
6b	Umbrandept	Fácil	2
	Andeptic Hapludoll	Libre	2
9	Orthic Rhodochrult	Libre	2

Tabla 31: Determinación de la variable **c**, por subgrupo por U.C.S.

Para la definición de la variable física **c** por U.C.S. se resumió la tabla mm, indicando que todas las U.C.S. presentan un permeabilidad libre correspondiendo a un **c** igual a 2.

Con los datos obtenidos se calculó el Índice de Erodabilidad (K) expresada por la ecuación de Wischmeier y Smith (1978) para cada unidad cartográfica de suelo, que se presenta en la Cuenca del Arroyo Itacaruaré (Tabla 32).

U.C.S	K ($t \cdot m^2 \cdot hs \cdot ha^{-1} \cdot J^{-1} \cdot cm^{-1}$)
3	0,38
4	0,30
5	0,38
6A	0,36
6B	0,50
9	0,38

Tabla 32: Índice de Erodabilidad (K) por U.C.S.

Para un análisis particular a nivel de subcuenca se realizó el cálculo del Índice de Erodabilidad (K) del arroyo Itacaruaré. A partir del análisis geoespacial de la cartográfica de la zonificación de K, se determinó la superficie ponderada (km^2) por subcuenca (Tabla 33). En la figura 22 se presenta la zonificación del K en la Cuenca del Arroyo Itacaruaré.

K Ponderado por Subcuenca ($t \cdot m^2 \cdot hs \cdot ha^{-1} \cdot J^{-1} \cdot cm^{-1}$)							
Subcuencas	U.C.S.						Total
	3	4	5	6A	6B	9	
1	0,05	0,00	0,15	0,08	0,11	0,01	0,40
2	0,03	0,00	0,01	0,17	0,11	0,08	0,40
3	0,19	0,00	0,00	0,14	0,06	0,00	0,39
4	0,05	0,02	0,06	0,20	0,06	0,00	0,38
5	0,05	0,00	0,00	0,24	0,10	0,00	0,39
6	0,13	0,00	0,00	0,20	0,06	0,00	0,38
7	0,05	0,01	0,00	0,06	0,33	0,00	0,45
8	0,11	0,00	0,00	0,20	0,08	0,00	0,39
9	0,19	0,00	0,00	0,15	0,04	0,00	0,38
Cuenca	0,05	0,01	0,05	0,16	0,10	0,02	0,39

Tabla 33: Índice de Erodabilidad (K) de la Cuenca del Arroyo Itacaruaré, ponderado por subcuenca y por U.C.S.

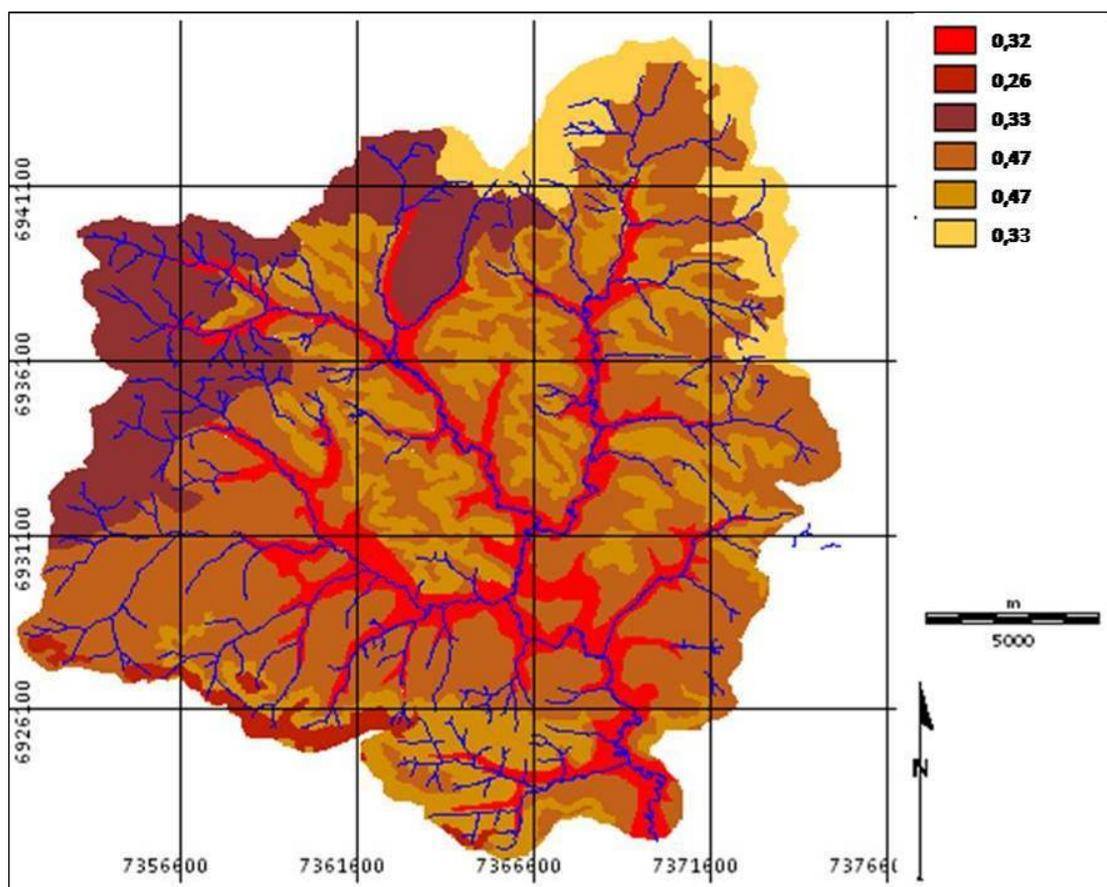


Figura 22: Mapa de índice de erodabilidad (K) de cada unidad cartográfica ($t \cdot m^2 \cdot hs \cdot ha^{-1} \cdot J^{-1} \cdot cm^{-1}$).

La Cuenca del Arroyo Itacaruaré se caracterizó por presentar un K de 0,39 ($t \cdot m^2 \cdot hs \cdot ha^{-1} \cdot J^{-1} \cdot cm^{-1}$). Este valor indica que la erodabilidad de los suelos en esta cuenca es baja debido al buen contenido de materia orgánica y que la fracción de limo y arena muy fina es reducida.

Se realizó un modelo matemático para estimar el K de la subcuenca en función de variables fácilmente medibles. Se obtuvo una regresión lineal múltiple que describe la relación entre el K y dos variables independiente: Materia Orgánica y contenido de arcilla ambas en porcentaje. La ecuación del modelo ajustado se expresa en la fórmula 25, con un R^2 de 95,83% y un error estándar de 0,0351363.

$$K = 0,868351 - 0,0568653 \cdot \text{Mat Org} - 0,00832395 \cdot A$$

Fórmula 25: Regresión lineal múltiple entre K y las variables materia orgánica y arcilla.

Donde:

K: Índice de Erodabilidad ($t \cdot m^2 \cdot hs \cdot ha^{-1} \cdot J^{-1} \cdot cm^{-1}$).

Mat. Org.: Materia Orgánica (%).

A: Arcilla (%).

En el grafico 38 corresponde al análisis entre los K calculados mediante Wischmeier y Smith (1978) y los K estimados mediante el modelo.

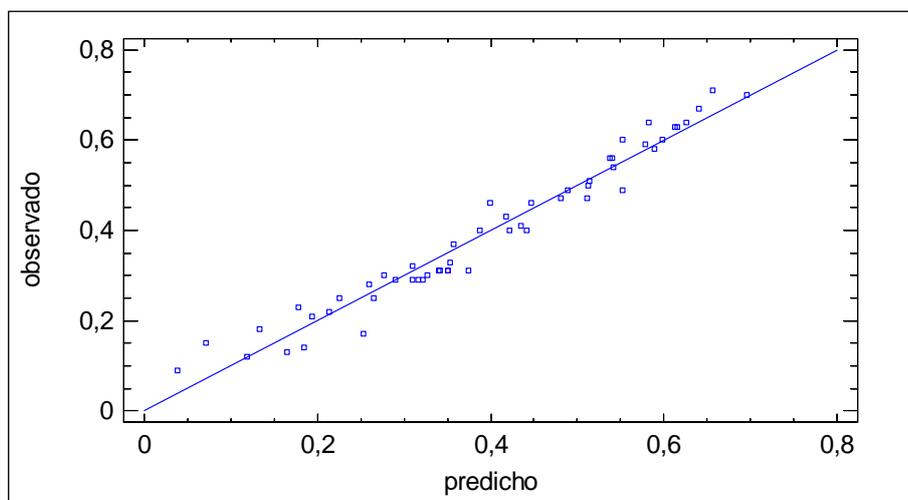


Grafico 38: K estimados mediante el modelo (eje X) y los K según Wischmeier y Smith (eje y).

5. Caracterización de la relación entre estructura y materia orgánica para los distintos suelos presenten en la cuenca.

A partir de los datos edafológicos y de la zonificación de la erodabilidad antecedentes en la cuenca, se caracterizó la relación entre estructura y materia orgánica para los distintos suelos, por medio de procesamientos matemáticos. Cabe mencionar que la materia orgánica contribuye a la estabilidad de la estructura del suelo, depende del tipo y contenido de arcilla en el suelo y del tipo y cantidad de materia orgánica. La estructura conseguida con una correcta presencia de materia orgánica es mucho más estable, admite el laboreo sin sufrir modificaciones importantes en la misma, así como se muestra más resistente a las acciones de los agentes erosivos.

Se realizó un estudio de la posible relación entre de la estructura y la materia orgánica, por medio de la generación de un modelo matemático. Se utilizó la codificación del Servicio de Conservación de Suelo de los Estados Unidos mencionada en materiales y métodos, en la definición de la erodabilidad del suelo (K).

A partir de los resultados encontrados del análisis de relación entre la materia orgánica (%) y el tipo, clase y grado de estructura, no se encontró una correlación estadísticamente significativa (Grafico 39, 40 y 41).

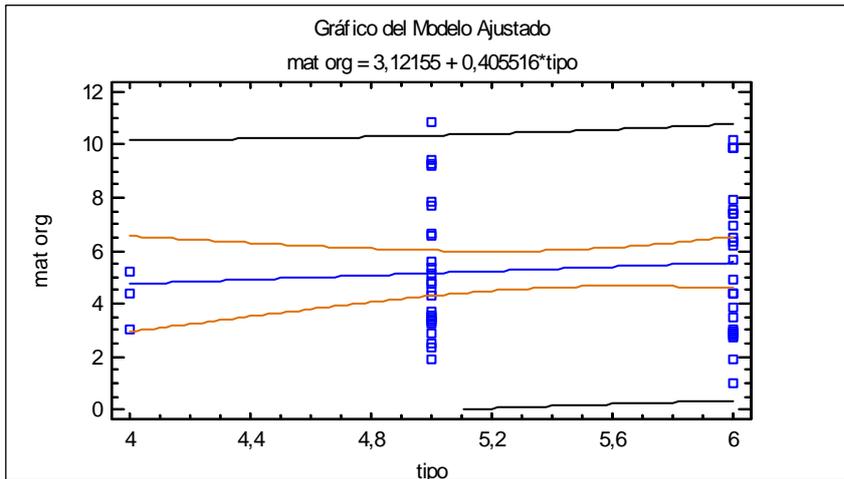


Gráfico 39: Relación entre Materia orgánica y Tipo de estructura.

Donde:

Coef. de Correlación = 0,095

R2 = 0,92 %

Error estándar = 2,556

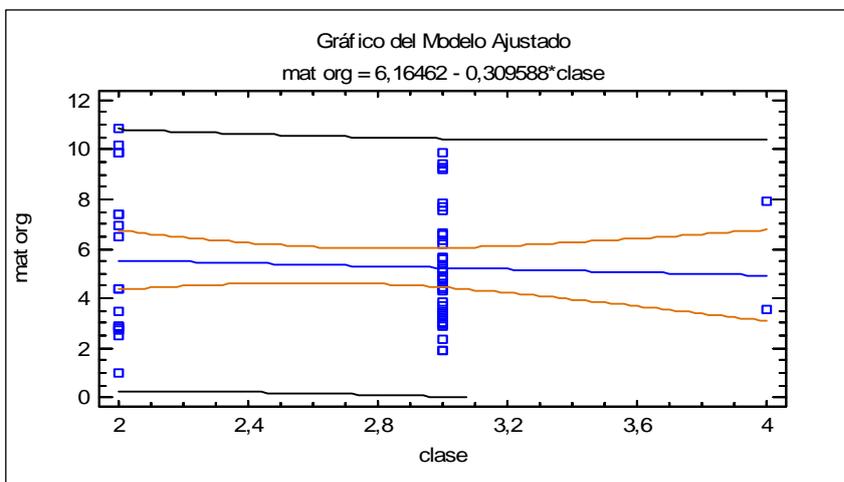


Gráfico 40: Relación entre Materia orgánica y Clase de estructura

Donde:

Coef. de Correlación = -0,064

R2 = 0,41 %

Error estándar = 2,563

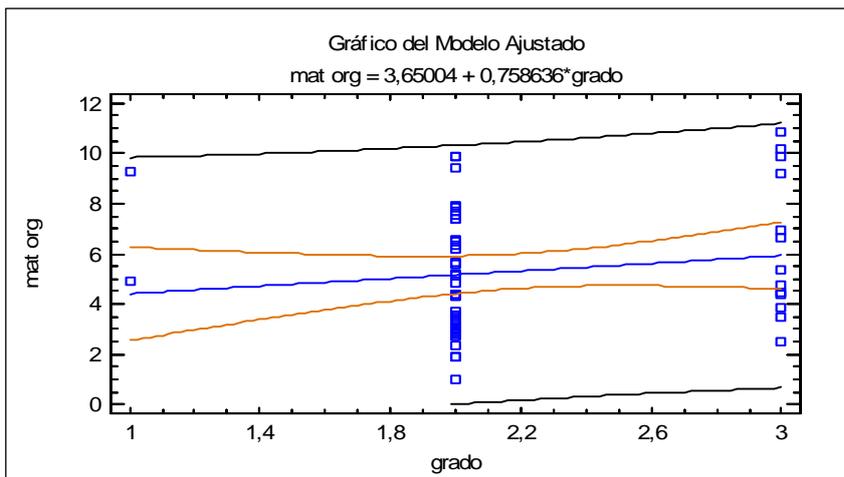


Gráfico 41: Relación entre Materia orgánica y grado de estructura

Donde:

Coef de Correlación = 0,146

R2 = 2,14 %

Error estándar = 2,540

Dada la baja correlación, gráfico RR, ZZ y ZZ, se realizó un análisis de la distribución de la materia orgánica por medio de un histograma, para realizar una clasificación en rangos (Gráfico 42).

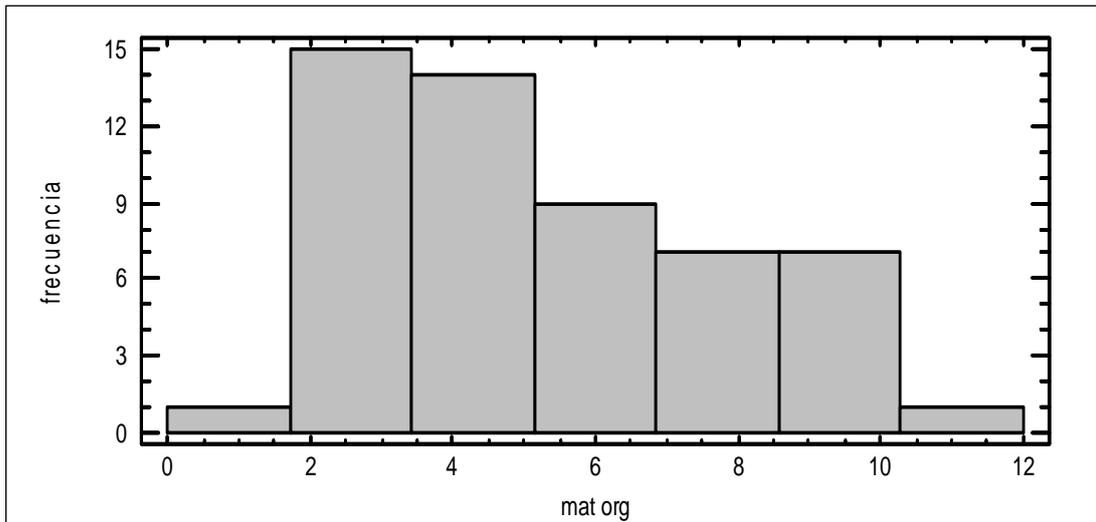


Gráfico 42 Histograma de materia orgánica (%).

A partir del gráfico 42 se procedió a la clasificación de los datos de materia orgánica en las siguientes clases según contenido en porcentaje (Gráfico 43):

- 1) <2; 2) 2-4; 3) 4-6; 4) 4-8; 5) 8-10; 6) >10

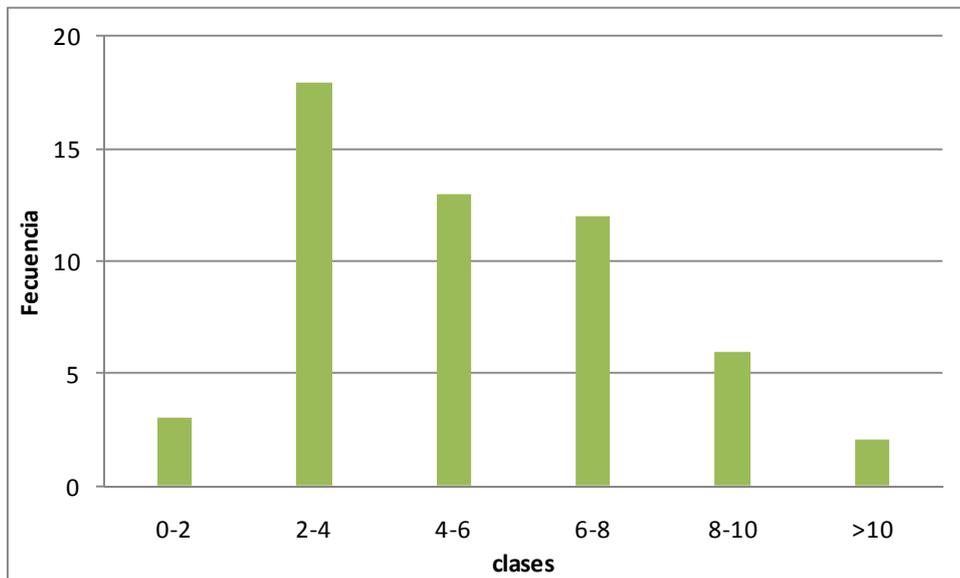


Gráfico 43 Histograma de Clases de Materia Orgánica.

Se realizó un análisis de regresión múltiple cuya variable dependiente fue: clases materia orgánica y las variables independientes: clase, grado y tipo de estructura, obteniéndose los resultados expresados en la tabla 34, que indica el análisis estadístico particular de cada uno de los parámetros y la tabla 35 donde se muestra el análisis de varianza de dicho modelo.

Parámetro	Estimación	Error Estándar	Estadístico (T)	Valor-P
CONSTANTE	1,76288	2,74723	0,641693	0,5240
Clase	-0,134311	0,380787	-0,352719	0,7258
Grado	0,429432	0,366805	1,17073	0,2473
Tipo	0,141453	0,327223	0,432285	0,6674

Tabla 34: Análisis estadístico por parámetros.

Fuente	Suma de Cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	3,5504	3	1,18347	0,74	0,5322
Residuo	79,7829	50	1,59566		
Total (Corr.)	83,3333	53			

Tabla 35: Análisis de varianza del modelo.

Donde:

$$R^2 = 4,26048 \%$$

$$R^2 \text{ (ajustado para g.l.)} = 0,0 \%$$

$$\text{Error estándar del est.} = 1,26319$$

$$\text{Error absoluto medio} = 1,02896$$

Los resultados del ajuste del modelo de regresión lineal múltiple permitieron describir la relación entre clases materia orgánica y las tres variables independientes. La ecuación del modelo ajustado con la formula 26.

$$\text{Clases mat org} = 1,76288 - 0,134311 * \text{clase} + 0,429432 * \text{grado} + 0,141453 * \text{tipo}$$

Formula 26: Modelo de regresión lineal múltiple para materia orgánica.

Donde:

Clases mat org: Clases de materia orgánica.

Clase: Clase de Estructura.

Grado: Grado de Estructura.

Tipo: Tipo de Estructura.

Puesto que el valor-P en la tabla 34 (ANOVA) es mayor que 0,05, no existe una relación estadísticamente significativa entre las variables con un nivel de confianza del 95,0%.

El estadístico R^2 indica que el modelo así ajustado explica 4,26048% de la variabilidad en clases materia orgánica. El estadístico R^2 ajustada, que es más apropiada para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 0,0%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 1,26319. Este valor puede usarse para construir límites para nuevas observaciones.

El error absoluto medio (MAE) de 1,02896 es el valor promedio de los residuos. Puesto que el valor-P es mayor que 0,05, no hay indicación de una autocorrelación serial en los residuos con un nivel de confianza del 95,0%.

Debido a que no se encontró una relación estadísticamente significativa entre las características que conforman la estructura y la materia orgánica se realizó un análisis con los parámetros de textura: limo y arcilla.

Parámetro	Estimación	Error Estándar	Estadístico (T)	Valor-P
CONSTANTE	6,17637	1,25487	4,92193	0,0000
limo	-0,0201557	0,0414955	-0,485731	0,6292
arcilla	-0,0147679	0,0327127	-0,451442	0,6536

Tabla 36: Análisis estadístico por parámetros

Fuente	Suma de Cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	3,60028	2	1,80014	0,27	0,7641
Residuo	339,426	51	6,65541		
Total (Corr.)	343,026	53			

Tabla 37: Análisis de varianza del modelo

Donde:

$$R^2 = 1,04956 \%$$

$$R^2 \text{ (ajustado para g.l.)} = 0,0 \%$$

$$\text{Error estándar del est.} = 2,57981$$

$$\text{Error absoluto medio} = 2,12166$$

Los resultados de ajuste del modelo de regresión lineal múltiple para describir la relación entre materia orgánica y dos variables independientes. La ecuación del modelo ajustado está representada en la formula 27.

$$\text{mat org} = 6,17637 - 0,0201557 * \text{limo} - 0,0147679 * \text{arcilla}$$

Formula 27: Modelo de regresión lineal múltiple para materia orgánica.

Puesto que el valor-P en la tabla ANOVA es mayor o igual que 0,05, no existe una relación estadísticamente significativa entre las variables con un nivel de confianza del 95,0%. El estadístico R^2 indica que el modelo así ajustado explica 1,04956% de la variabilidad en materia orgánica. El estadístico R^2 ajustada, que es más apropiada para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 0,0%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 2,57981.

También se ha realizado el ANOVA relacionando materia orgánica y la vegetación existente en el perfil en el momento de la toma de muestra del suelo.

Parámetro	Mínimos Cuadrados Estimados	Estándar Error	Estadístico (T)	Valor-P
Intercepto	5,48735	0,694887	7,89675	0,0000
Pendiente	-0,400175	0,252802	-1,58296	0,1227

Tabla 38: Análisis estadístico por parámetros.

Fuente	Suma de Cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	12,1707	1	12,1707	2,51	0,1227
Residuo	165,141	34	4,85709		
Total (Corr.)	177,312	35			

Tabla 29: Análisis de varianza del modelo

Donde:

Coefficiente de Correlación = -0,261992

$R^2 = 6,864 \%$

R^2 (ajustado para g.l.) = 4,12471 %

Error estándar del est. = 2,20388

Error absoluto medio = 1,72276

Los resultados de ajustar un modelo de regresión lineal para describir la relación entre materia orgánica y vegetación. La ecuación del modelo ajustado (fórmula 28):

$$\text{Mat Org} = 5,48735 - 0,400175 * \text{vegetación}$$

Fórmula 28: Modelo regresión lineal

Donde:

Mat Org: Materia Orgánica (%)

Vegetación: Tipos de Vegetación.

Puesto que el valor-P en la tabla ANOVA es mayor a 0,05, no hay una relación estadísticamente significativa entre materia orgánica y vegetación con un nivel de confianza del 95,0% ó más. El estadístico R^2 indica que el modelo ajustado explica 6,864% de la variabilidad en materia orgánica. El coeficiente de correlación es igual a -0,261992, indicando una relación relativamente débil entre las variables. El error estándar del estimado indica que la desviación estándar de los residuos es 2,20388.

Por último se realizó una regresión lineal múltiple para cuantificar la materia orgánica utilizando como variable independiente: limo, arcilla y tipo de cobertura vegetal. Los resultados alcanzados se presentan en la tabla TT de análisis estadísticos de los parámetros y la tabla U de análisis de varianza del modelo.

Parámetro	Estimación	Error Estándar	Estadístico (T)	Valor-P
CONSTANTE	3,87914	1,34157	2,89149	0,0068
limo	0,0519324	0,03524	1,47368	0,1503
arcilla	0,011642	0,0270009	0,431172	0,6692
vegetación	-0,427217	0,257932	-1,65631	0,1074

Tabla 30: Análisis estadístico por parámetros

Fuente	Suma de Cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	22,9114	3	7,63712	1,58	0,2127
Residuo	154,4	32	4,82501		
Total (Corr.)	177,312	35			

Tabla 31: Análisis de varianza del modelo.

Donde:

$$R^2 = 12,9215 \%$$

$$R^2 \text{ (ajustado para g.l.)} = 4,75792 \%$$

$$\text{Error estándar del est.} = 2,19659$$

$$\text{Error absoluto medio} = 1,71928$$

Los resultados de ajuste del modelo de regresión lineal múltiple para describir la relación entre materia orgánica y tres variables independientes se presentan en la fórmula 29.

$$\text{Mat Org} = 3,87914 + 0,0519324 * \text{limo} + 0,011642 * \text{arcilla} - 0,427217 * \text{vegetación}$$

Fórmula 29: Modelo de regresión lineal múltiple para materia orgánica.

Puesto que el valor-P en la tabla ANOVA es mayor o igual que 0,05, no existe una relación estadísticamente significativa entre las variables con un nivel de confianza del 95,0%.

El estadístico R^2 indica que el modelo así ajustado explica 12,9215% de la variabilidad en materia orgánica. El estadístico R^2 ajustado es 4,75792%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 2,19659.

Por último se realizó el análisis considerando la vegetación y el contenido de limo, expresando los siguientes resultados:

Parámetro	Estimación	Error Estándar	Estadístico (T)	Valor-P
CONSTANTE	4,17767	1,13484	3,68129	0,0008
B.limo	0,0498675	0,0344797	1,44629	0,1575
vegetación	-0,403456	0,248849	-1,62129	0,1145

Tabla 32: Análisis estadístico por parámetros.

Fuente	Suma de Cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	22,0144	2	11,0072	2,34	0,1122
Residuo	155,297	33	4,70598		
Total (Corr.)	177,312	35			

Tabla 33: Análisis de varianza del modelo.

Donde:

$R^2 = 12,4156$ por ciento

R^2 (ajustado para g.l.) = 7,10749 por ciento

Error estándar del est. = 2,16933

Error absoluto medio = 1,74896

La ecuación de ajuste del modelo de regresión lineal múltiple para describir la relación entre materia orgánica y limo – vegetación, se expresa en la fórmula 30, las tablas 32 y 33 y gráfico 44.

$$\text{Mat Org} = 4,17767 + 0,0498675 * \text{limo} - 0,403456 * \text{vegetación}$$

Fórmula 30: Modelo de regresión lineal múltiple para materia orgánica.

Puesto que el valor-P en la tabla ANOVA es mayor o igual que 0,05, no existe una relación estadísticamente significativa entre las variables con un nivel de confianza del 95,0%.

El estadístico R^2 indica que el modelo así ajustado explica 12,4156% de la variabilidad en materia orgánica. El estadístico R^2 ajustada, que es más apropiada para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 7,10749%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 2,16933.

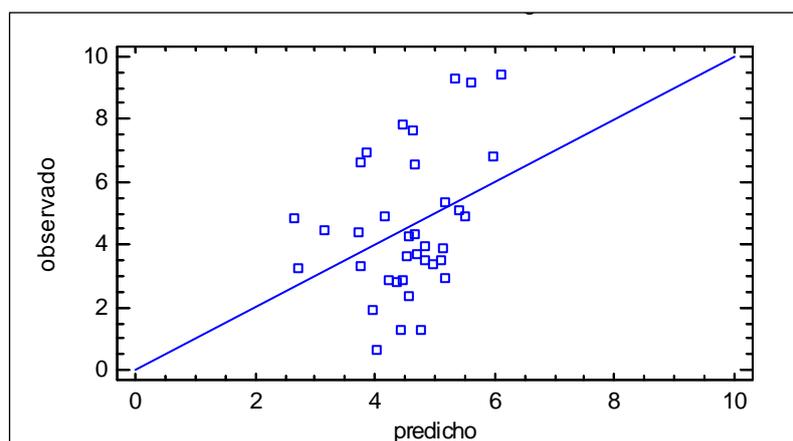


Gráfico 44: Relación entre la materia orgánica medida y la estimada por el modelo de la fórmula 30

De los modelos estadístico generados para la determinación del contenido de materia orgánica, se encontró una relación no significativa entre las variables analizadas.

6. Aplicación del Método Número de Curva (CN) para identificar variación temporal de la escorrentía

Para estudiar la variación temporal de la escorrentía se realizaron tres períodos:

- Estudio Interanual:

06/03/1999	16/02/2004	13/02/2009
------------	------------	------------

- Estudio Intraanual:

Época Húmeda		Época de Sequía	
06/03/1999	30/09/1999	16/02/2004	07/06/2004

Este análisis se realizó a nivel de subcuenca, estableciendo el CN por fecha (Tabla 34).

Subcuencas	Estudio Interanual			Época Húmeda		Época de Sequía	
	06/03/1999	16/02/2004	13/02/2009	06/03/1999	30/09/1999	16/02/2004	07/06/2004
1	65	65	68	65	66	65	65
2	59	57	60	59	60	57	58
3	67	63	68	67	67	63	63
4	54	55	56	54	54	55	54
5	57	57	59	57	60	57	58
6	59	55	56	59	55	55	57
7	46	40	41	46	42	40	41
8	61	55	56	61	57	55	56
9	67	61	64	67	64	61	62
Cuenca	58	57	59	58	58	57	57

Tabla 34: CN para cada subcuenca y distintos tipos de estudios.

A partir de la tabla 34 se visualiza que hay un leve cambio en el CN en los últimos 10 años. A nivel general el CN alcanza un rango de valores entre 40 y 68. Estos valores establecen características edáficas de alta infiltración franco arenosa hasta pedregosos. En relación a las características de cobertura, la densidad de vegetación es media con cobertura regular a

buena, dependiendo del año. Estas condiciones indican una mejor infiltración y aprovechamiento del agua a nivel superficial.

Las tormentas analizadas son de más de 13,5 mm, con fecha coincidente al mes de toma de imágenes satelitales. En la tabla 35 se presentan ambos datos. Esta misma tabla expresa los resultados de la aplicación de la metodología de CN para la cuantificación de la escorrentía por subcuenca y para las precipitaciones anteriormente mencionadas.

FECHA	Estudio Interanual			Época Húmeda		Época sequia	
	16/02/1999	13/03/2004	11/02/2009	16/02/1999	04/09/1999	13/03/2004	23/06/2004
PREC.TOTAL (mm)	108,88	36,43	70,70	108,88	87,26	36,43	28,89
1	30,45	0,56	13,17	0,00	19,44	0,56	0,02
2	21,65	0,00	6,58	0,00	12,80	0,00	0,00
3	33,65	0,28	13,17	0,00	20,68	0,28	0,00
4	15,26	0,00	4,11	0,00	7,43	0,00	0,00
5	18,99	0,00	5,91	0,00	12,80	0,00	0,00
6	21,65	0,00	4,11	0,00	8,24	0,00	0,00
7	6,98	0,00	0,00	0,00	0,80	0,00	0,00
8	24,44	0,00	4,11	0,00	9,96	0,00	0,00
9	33,65	0,09	9,59	0,00	17,09	0,09	0,00
Cuenca	20,30	0,00	5,91	0,00	10,87	0,00	0,00

Tabla 35: Escorrentía en (mm) para cada subcuenca.

Dada las características de cobertura vegetal y uso de suelo de regular a bueno y de suelo medianamente permeable, la infiltración se ve muy favorecida en la Cuenca del Arroyo Itacaruaré. A nivel de subcuenca la variaciones de CN establecieron el diferencial de escorrentía, visualizando su nulidad en situaciones donde se presenta el bosque y matorral y al mismo tiempo las precipitaciones son escasas como es el caso específico de la época seca.

Al analizar los resultados alcanzados se visualiza que la cuenca presenta baja escorrentía debido principalmente a su grupo hidrológico ponderado A. A partir de esto se continuó el estudio para verificar la poca escorrentía generando 10 casos hipotéticos de cobertura vegetal y uso del suelo para diferentes tormentas durante el período 1987-2007. Estas tormentas fueron las expresadas en la tabla 36.

Fecha	Precip (mm)	Duración (hs)	I ₃₀ (mm*30min ⁻¹)
16/02/1994	178	28	22,8
11/12/2003	167	11	32
01/03/2002	53	6	17
07/09/1999	52	11	8,8
12/09/1998	14	2	28
02/08/1997	13,5	3	5,3

Tabla 36: Tormentas seleccionadas del período 1987-2007.

La cobertura vegetal y uso del suelo para los diez casos hipotéticos fueron seleccionados de situación reales que se presentan en la Cuenca del Arroyo Itacaruaré, a nivel de predio, establecida por el relevamiento a campo realizado, los CN que corresponde a cada tipo de cobertura vegetal y uso del suelo y condición de infiltración se presentan en la tabla 37.

Tipo de Cobertura Vegetal y Uso del Suelo	Condición de infiltración	CN
Bosque	Bueno	26
Matorral	Medio	35
Ganadero Forestal	Regular	36
Pastizal	Regular	49
Árboles Frutales	Malo	57
Sembrado en Línea	Bueno	58
Forraje para Pastoreo	Malo	68
Cultivo en Hilera	Malo	72
Camino de Tierra	-	72
Suelo Desnudo	Bueno	74

Tabla 37: CN para los casos hipotéticos de tipo de Cobertura Vegetal y Uso del Suelo.

Como resultado del análisis de la escorrentía para los diez casos hipotéticos se obtuvo el gráfico 45, donde se observa que solo las dos tormentas de mayor precipitación produjeron escorrentía.

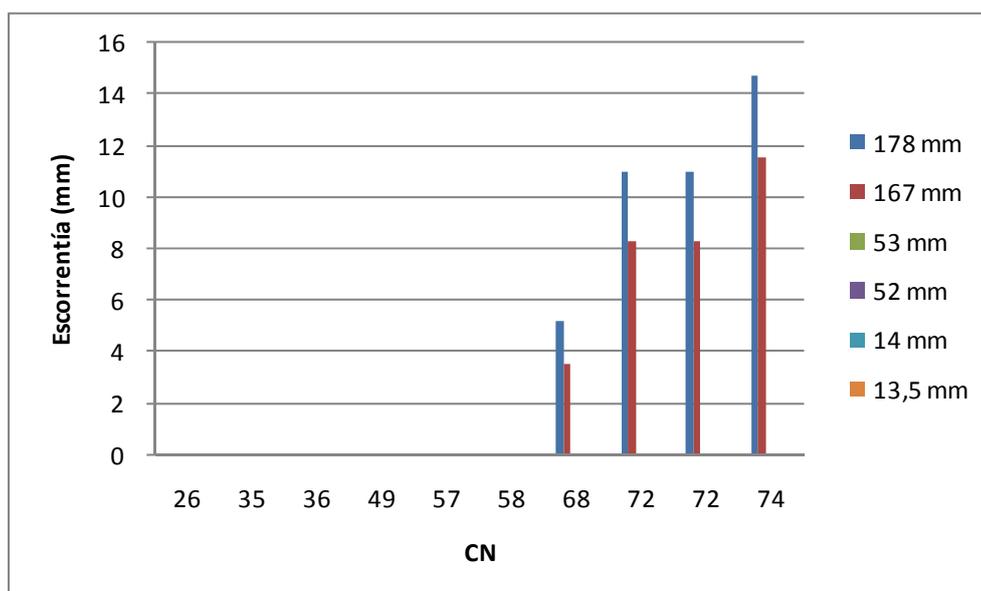


Gráfico 45: Escorrentía determinada por el método de CN.

7. Comprobar la variación temporal – espacial del escurrimiento superficial en la Cuenca del Arroyo Itacaruaré por medio del Coeficiente de Escorrentía.

Para la comprobación de la variación temporal – espacial del escurrimiento superficial en la Cuenca del Arroyo Itacaruaré por medio del coeficiente de escorrentía (CE), se mantuvo el mismo criterio que el inciso 6. Se determinó el coeficiente de escorrentía a nivel de subcuenca y para tres períodos: interanual, Época Húmeda y Época de Sequía.

Los resultados alcanzados de la aplicación de la metodología se presentan en la tabla 38.

La variación interanual expresada en la tabla YY, indica que en un año normal de precipitación media anual, se produjo un 30 % de coeficiente de escorrentía como máximo, y en un año seco no alcanzó el 2 % de coeficiente de escorrentía, indicando esto una alta infiltración, siendo CE nulo en casi todas subcuencas.

En el estudio temporal se observa que dentro del año no hay variaciones importantes del coeficiente de escorrentía, para una época húmeda. En la época seca la infiltración superó la escorrentía a nivel de cuenca.

Fecha	Estudio Interanual			Época Húmeda		Época de Sequía	
	16/02/1999	13/03/2004	11/02/2009	16/02/1999	04/09/1999	13/03/2004	23/06/2004
Precip Total (mm)	108,88	36,43	70,70	108,88	87,26	36,43	28,89
1	27,96	1,55	18,62	27,96	22,28	1,55	0,06
2	19,88	0,00	9,31	19,88	14,67	0,00	0,00
3	30,91	0,77	18,62	30,91	23,70	0,77	0,00
4	14,02	0,00	5,82	14,02	8,52	0,00	0,00
5	17,44	0,00	8,36	17,44	14,67	0,00	0,00
6	19,88	0,00	5,82	19,88	9,44	0,00	0,00
7	6,41	0,00	0,00	6,41	0,91	0,00	0,00
8	22,45	0,00	5,82	22,45	11,41	0,00	0,00
9	30,91	0,26	13,57	30,91	19,58	0,26	0,00
Cuenca	18,65	0,00	8,36	18,65	12,46	0,00	0,00

Tabla 38: Coeficiente de Escorrentía (%) para cada subcuenca.

Se determino el CE, al igual que en el inciso 6, el análisis de los diez casos hipotéticos de cobertura de vegetación y uso de suelo, para las tormentas expresadas en la tabla 36, siendo los tipos de cobertura vegetal y uso del suelo los indicados en la tabla 37. Los resultados de este análisis se expresan en el gráfico 46. Los resultados expresados en el grafico 46 indican que la capacidad de infiltración de la cuenca es relativamente alta, manifestando el déficit de escorrentía a nivel de cuenca.

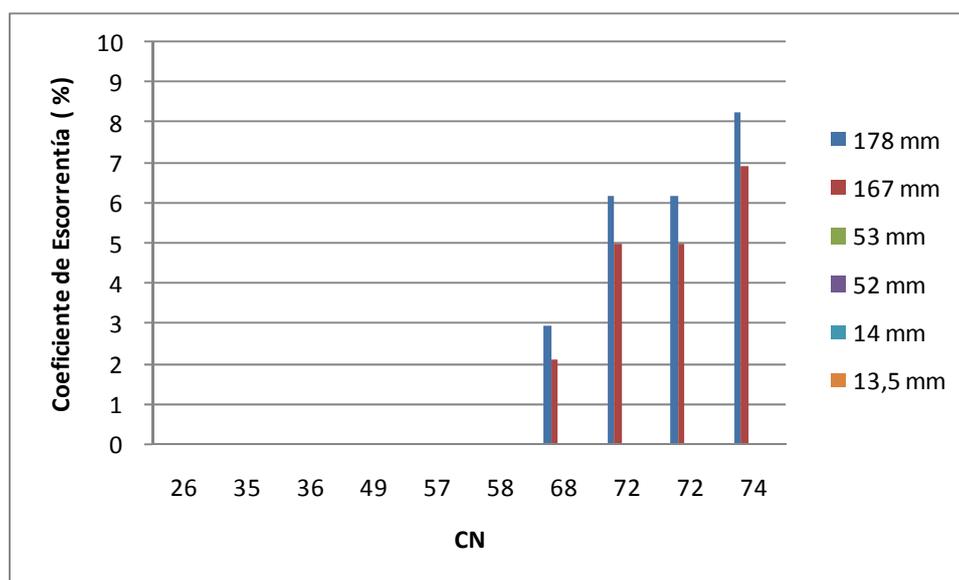


Gráfico 46: Coeficiente de Escorrentía (%) para cada CN.

8. Formulación de diferentes medidas conservacionistas para el control de la escorrentía superficial según uso actual de suelo.

A partir de los resultados alcanzados se verifica que en la Cuenca del Arroyo Itacaruaré la escorrentía alcanza bajos valores, expresándose en situaciones de tormentas extremas.

En los sucesivos reconocimientos a campo se visualizó la presencia de escurrimiento que potencialmente generará erosión puntual y/o en profundidad a nivel de predio, particularmente en áreas de cultivos industriales, anuales y bordes de caminos.

En la Cuenca del Arroyo Itacaruaré presenta una importante superficie ocupada por bosque nativo continuo. Las actividades de agricultura, ganadería y forestación, con la consecuente extracción maderera, redujeron en gran medida la superficie ocupada por bosques. Esta pérdida de los bosques nativos y la fragmentación de las masas remanentes acarrearán consecuencias ambientales negativas, especialmente erosión y pérdida de fertilidad de los suelos. Fragmentación: consiste en la modificación de la estructura natural del paisaje y generalmente implica la pérdida de la continuidad espacial de los bosques. La fragmentación es de importancia ya que condiciona la efectividad de medidas de conservación y las opciones de manejo de posible aplicación.

La zonificación de los cambios producidos durante el período 1999 hasta 2009 expresan que las zonas con presencia de matorral o cultivos industriales son las que presentan mayor grado de ocupación de superficie. En la figura 23 se visualiza los cambios ocurridos de cobertura vegetal y uso del suelo, y en la tabla UU se muestra su superficie.

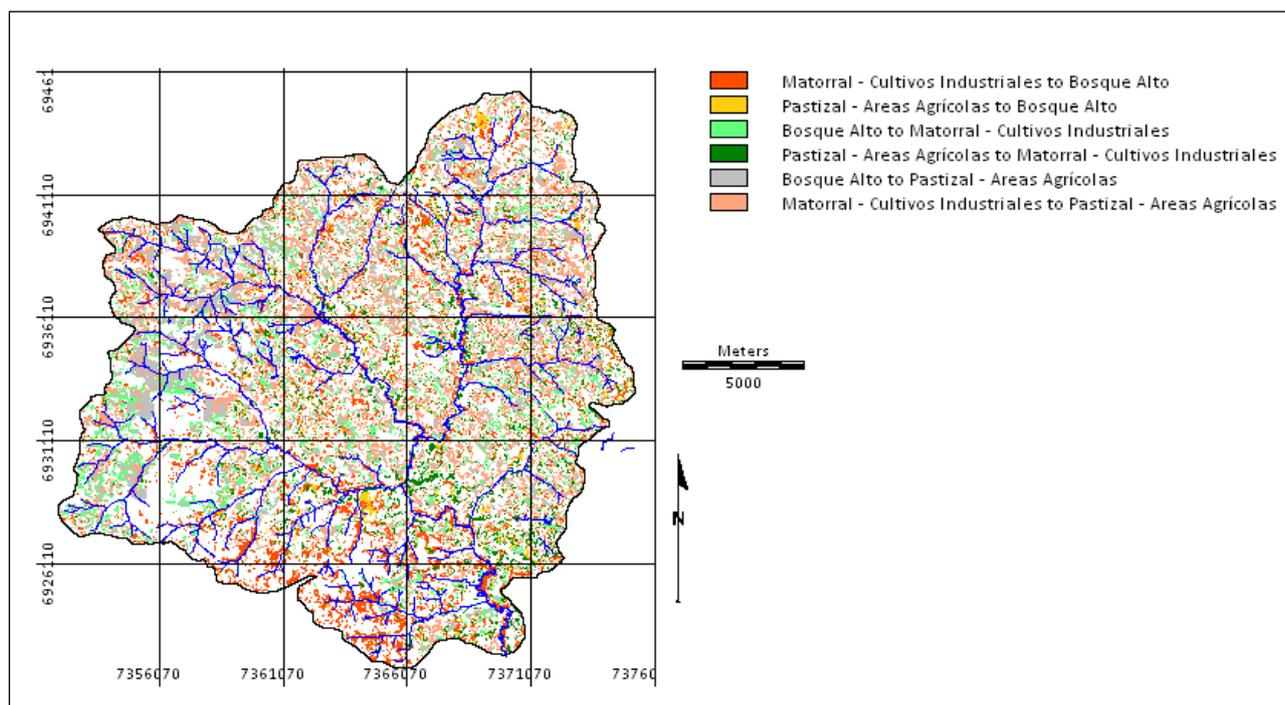


Figura 23: Cambios ocurridos de cobertura vegetal y uso del suelo, período 1999-2009.

Vegetación Año 1999	Vegetación Año 2009	Superficie (ha)
Matorral- Cultivos Industriales	Bosque Alto	37.2312000
Pastizal - Áreas Agrícolas	Bosque Alto	6.0552000
Bosque Alto	Matorral - Cultivos Industriales	26.0505000
Pastizal - Areas Agrícolas	Matorral - Cultivos Industriales	15.4548000
Bosque Alto	Pastizal - Áreas Agrícolas	24.8922000
Matorral - Cultivos Industriales	Pastizal - Áreas Agrícolas	48.2337000

Tabla 39: Superficie (ha) de cambios de cobertura vegetal y uso del suelo, periodo, 1999-2009.

A continuación se proponen medidas correctivas de protección y restauración de la cuenca, con el fin de optimizar la producción por unidad de superficie, respetando el principio de rendimiento sostenido y las condiciones ecológicas, económicas y sociales. Estas medidas son sugeridas específicamente en las zonas de cambio de cobertura vegetal y uso del suelo, caracterizado en la tabla 39 como zona con presencia de matorral.

- Cerramientos para la regeneración del bosque: se trata de cerrar una determinada área, para favorecer la regeneración o sucesión natural de las especies hasta que alcancen su madurez, asemillen y logren incrementar la cobertura vegetal del suelo.
- Mejoramiento de los bosquetes en galería mediante la revegetación de los bordes de los cauces y caminos, con especies nativas.
- Plantaciones silvopastoriles.
- Repoblación forestal: establecer o restablecer la vegetación en las superficies desprovistas y expuestas a la erosión por las lluvias y escorrentía superficial con árboles y arbustos nativos principalmente.
- Siembras en curvas de nivel: consiste en disponer los cultivos en surcos en sentido transversal a la pendiente, siguiendo niveles horizontales, de esta manera el agua es absorbida en forma paulatina por el suelo.
- Cubiertas verdes.
- Control de tránsito de maquinaria de uso agrícola para evitar la compactación y deterioro del suelo.

9. Identificar áreas potenciales para la implementación del sistema silvopastoril como medida conservacionista en la Cuenca del Arroyo Itacaruaré.

Dadas las posibilidades limitadas de modificar las características morfológicas y climáticas de la cuenca, se debe explorar al máximo las posibilidades que ofrece el manejo de la vegetación para controlar el proceso hidrológico; por tanto, la interacción de la vegetación Bosque Alto, Matorral- Cultivos Industriales y Pastizales- Áreas Agrícolas, en el ciclo hidrológico, debe ser estudiada en las condiciones particulares de cada caso.

Las áreas potenciales de la cuenca del arroyo Itacaruaré, para la implementación de un sistema silvopastoril dentro de la clase de cobertura de vegetación y uso del suelo, Bosque alto, se puede definir las categorías de Bosque nativo, capuerón en un estado de sucesión secundaria y forestación adulta implantada. En esta última se recomienda adaptar la cobertura vegetal por medio de manejo silvícola (poda y raleo), y control de carga animal por medio de la definición de parcelas y rotación de ganado. Esta medida aporta una mejora en la productividad ganadera y silvícola por medio de engorde de lo vacuno y mejora de la calidad de madera, respectivamente.

En la clase de cobertura vegetal y uso de suelo denominado matorral y cultivos industriales se recomienda un control de la distribución e implementación de cultivos, como yerba mate y té. Las áreas que se encuentran ocupadas por matorral, que no superen el 30 % de pendiente del terreno, con una potencial aptitud forestal, el sistema silvopastoril es una alternativa óptima, para diversificación productiva. En la figura HH se presenta un ejemplo generado por S.I.G. donde se presenta los cambios de superficie de ocupación de matorral entre 1999 y 2009 indicando la pérdida permanencia y la ganancia en superficie, la interpretación de la misma indica, la permanencia de 56,5 km² de este tipo de cobertura en los últimos 10 años. Además cambiaron su uso 85,4 km² y actualmente se incorporaron a esta clase 41,5 km² (Figura 24).

La implementación de sistemas silvopastoriles en la clase de cobertura de pastizal y áreas agrícolas, se recomienda para pastizales degradados con el tipo de suelo de las U.C.S. 3, 4, 5 y 9. La aplicación de este sistema generará un control de erosión laminar y en regueros, la mejora de la infiltración, generación de un microclima adecuado para el ganado, sombreamiento. También los árboles, con su profundo crecimiento radicular en profundidad y en extensión, ayuden al suelo a mantener su estructura o a mejorarla en áreas degradadas, provocando una disminución en la densidad aparente y en la resistencia a la penetración y un incremento en la velocidad de infiltración.

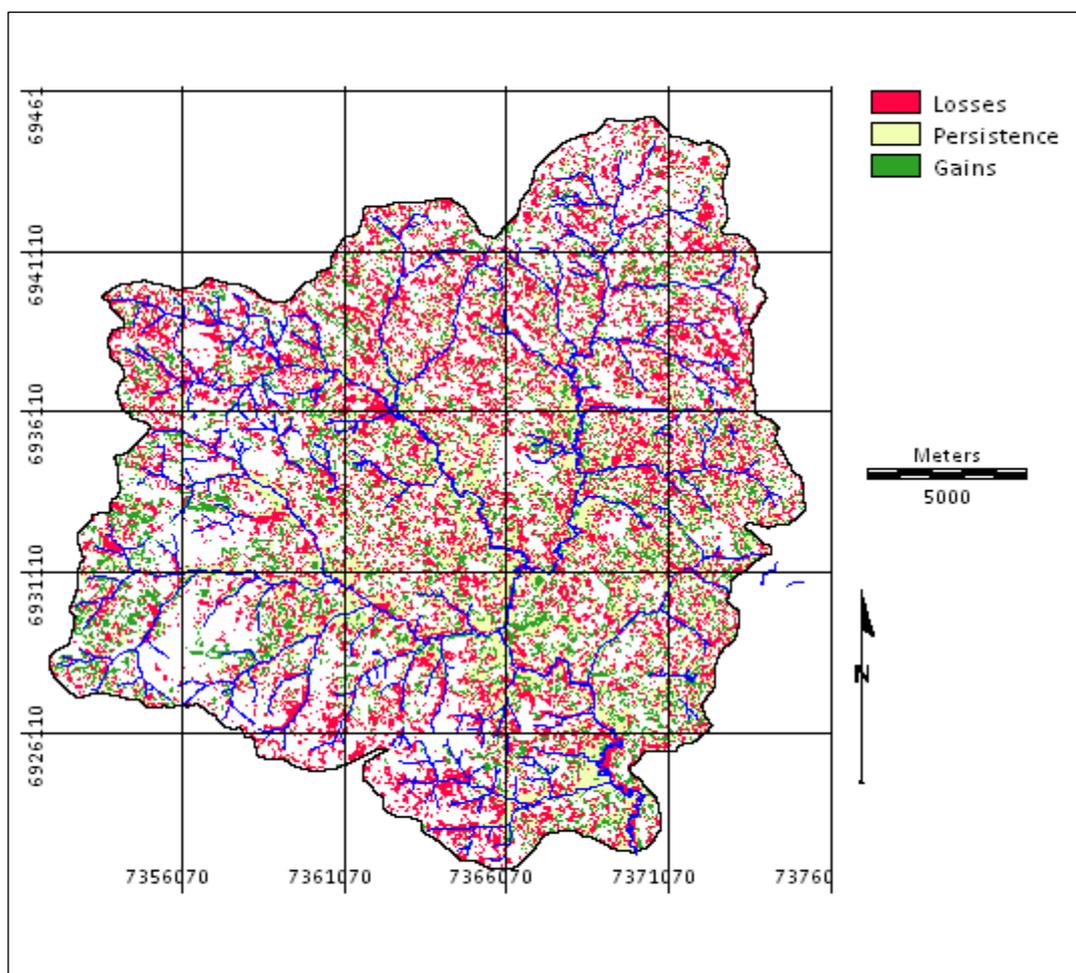


Figura 24: Cambios de superficie de ocupación de matorral y cultivos industriales.

La implementación de medida conservacionista permitirá la generación de un ordenamiento hidrológico forestal. Esta se debe plantear para eventos de índole torrencial de recurrencias moderadas o altas. Los eventos extremos deben asumirse como elementos que puedan proporcionar unos criterios complementarios. La ordenación se plantea como una técnica de aproximaciones sucesivas, por medio del establecimiento de las medidas mencionadas, que permiten el mejor funcionamiento hidrológico y de utilización de los recursos agua y suelo en la Cuenca del Arroyo Itacaruaré. Esta ordenación deberá tener un potencial plan de vigilancia ambiental para a recopilación de información sobre los efectos de las actuaciones proyectadas, modificando y /o adaptando a los resultados reales. Además se recomienda el seguimiento y control de las medidas correctoras propuestas, rediseñándose en función de la problemática real que se observe.

El objetivo es mantener la cuenca hidrográfica en buenas condiciones, a la vez que darle un uso múltiple, por lo tanto, se recomienda controlar las actividades antrópicas que se desarrollan en la cuenca de manera que se altere lo menos posible el suelo y la cobertura vegetal.

CONCLUSION

La presente tesis estableció pautas particulares para la Cuenca del Arroyo Itacaruaré, de cuantificación de la escorrentía superficial temporal bajo diferentes usos de suelos. La evaluación temporal de la escorrentía superficial en la cuenca permitió formular medidas conservacionistas según los diferentes usos del suelo, que potencialmente puestas en práctica, reducirán los problemas de pérdidas de cultivo y bosques.

El estudio proporcionó la caracterización de la Cuenca del Arroyo Itacaruaré, Provincia de Misiones, mediante la zonificación cartográfica de los distintos parámetros que describió el área de estudio, por medio de los mapas de primer y segundo orden. Estos mapas obtenidos por el procesamiento con S.I.G permitieron una caracterización y zonificación de los distintos parámetros que define la morfología de la cuenca, la distribución en el terreno de la composición y estructura de los distintos materiales originales encontrados en la cuenca en estudio, siendo la de mayor presencia las rocas efusivas, y la identificación y zonificación de las unidades cartográfica de suelo de la cuenca, predominando las unidades 6a y 6b.

A partir del estudio de las 701 bandas pluviográficas Estación Experimental de Cerro Azul, de las tormentas individuales del período entre 1987 – 2006, se determinó la erosividad de las precipitaciones (R), a nivel anual, mensual e individual. El resultado alcanzado obtuvo un valor de Índice de Erosión Pluvial medio anual de 833,74 ($J \cdot m^{-2} \cdot cm \cdot hs^{-1}$). Además se generó un modelo matemático para estimar el R a partir de parámetros de fácil determinación, a nivel anual, mensual e individual. Se observó que las precipitaciones en la Cuenca del Arroyo Itacaruaré presentan un alto Índice de Erosión Pluvial, por lo cual se reconoce que la cuenca presenta tormentas con un alto poder de erosividad.

Mediante el estudio de los diferentes perfiles de los horizontes edáficos que componen de cada unidad cartográfica del suelo en la Cuenca del Arroyo Itacaruaré, se cuantificó del Índice de erodabilidad del suelo (K). La cuenca alcanza un valor de K ponderado de 0,39 ($t \cdot m^2 \cdot hs \cdot ha^{-1} \cdot J^{-1} \cdot cm^{-1}$) y variando según las subcuencas entre 0,38 y 0,50. Estos valores de (K) fueron expresados en un mapa cartográfico donde se zonificaron los respectivos valores de cada subcuenca. Se realizó una modelización matemática con distintas variables que conforman el índice de erodabilidad, para establecer el K a partir de variables fácilmente medibles a campo, con lo cual se obtuvo una fórmula que representa la cuenca.

Se procedió a establecer una relación entre estructura y materia orgánica para las distintas unidades cartográficas de suelos presenten en la cuenca. En dicho estudio se encontró una nula correlación entre los niveles de materia orgánica y los parámetros que caracterizan a la estructura. Los estudios efectuados fueron una correlación entre los parámetros que determinan la estructura: tipo, clase, grado y la materia orgánica, no encontrando una correlación estadísticamente significativa entre estos parámetros. Posteriormente se realizó una correlación entre los componentes que conforman la textura: arena, limo, arcilla y materia orgánica, nuevamente no se encontró una correlación entre las variables. Además se

correlacionó a la materia orgánica con el tipo de vegetación presente en el momento de la toma de muestra, sin encontrar una correlación estadísticamente significativa. Por lo tanto, se considera que los modelos matemáticos generados no permiten establecer la relación teórica entre el contenido de materia orgánica y la estructura del suelo.

Con la utilización de imágenes satelitales, se reconocieron los principales tipos de cobertura vegetal y uso del suelo y su ubicación en el terreno, en diferentes años de estudio, a partir de ello, se logró una zonificación y categorización en tres clases: Bosque altos, Matorrales - Cultivos industriales y Pastizales - Áreas Agrícolas.

Se aplicó del Método Número de Curva (CN) para las diferentes coberturas vegetales y usos del suelo. Utilizándose para dicha caracterización la clases de cobertura vegetal y uso del suelo antes mencionadas y el grupo hidrológico de la cuenca. Se obtuvo una valoración de CN entre 40 y 88 para los distintos tipos de cobertura vegetal y uso del suelo y según grupos hidrológicos, siendo el grupo hidrológico ponderado de la cuenca el A.

Con la caracterización del CN y del grupo hidrología de la Cuenca del Arroyo Itacaruaré, se procedió al análisis de la escorrentía de la cuenca y sus subcuencas. Se comprobó que existe una escorrentía ante la presencia de precipitaciones extremas y la variación temporal y espacial es mínima. Con el estudio realizado de situaciones hipotéticas de tipo de cobertura vegetal y uso del suelo, se corroboró nuevamente que la presencia de escorrentía se produce antes situaciones de precipitaciones extremas, siendo nula en situaciones normales, debido a la infiltración que poseen los suelo que predominan en la cuenca de estudio.

La Cuenca del Arroyo Itacaruaré presenta escorrentía superficial en función del tipo de precipitación que se produce. Por ello, para la formulación de medidas conservacionistas que se deben aplicar a la cuenca, éstas se establecen en función del tipo de suelo, grupo geológico y tipo de cobertura vegetal y uso del suelo. Si bien a la escala de cuenca los problemas de escorrentía superficial son leves, esta tesis la considera como punto de partida para establecer una línea base de conocimientos que permita evaluar las mejores alternativas de manejo y administración de suelo y aguas dentro de un enfoque integral.

El reconocimiento a campo del área de estudio demostró la existencia de erosión hídrica puntual por escorrentía. Este reconocimiento puntual de escorrentía en profundidad, genera la pauta de sugerir prácticas de conservación del suelo, estableciendo además que son sitios particulares donde se produjeron cambios en el transcurso de los años en la cobertura vegetal y uso del uso del suelo.

La implementación del sistema silvopastoril, debe ser adoptada como, una medida de corrección de áreas degradadas, de conservación de suelo, y como una medida para la incrementación de la productividad del suelo. También se considera su importancia como un sistema de diversificación de productos en el espacio y tiempo, provocando una mayor rentabilidad económica para el productor.

El estudio de la cuantificación de la escorrentía con la implementación de áreas pilotos a nivel de microcuencas o de parcelas experimentales, conseguiría explicar los problemas de erosión hídrica observados a campo y de por medio de estas realizar nuevas medidas de

conservación de suelo y agua. Como objetivo final de estas áreas sería la conversión en centros regionales de transferencia y aplicación de tecnología. El estudio de la caracterización y distribución de la cobertura vegetal y uso del suelo con otra escala de estudio permitiría una clasificación más detallada de la misma.

BIBLIOGRAFIA

Antezana, J. C., 2001 Calibración de los Factores de Erosión utilizando la Ecuación Universal de Perfiles de Suelo, Revisado "RUSLE" en sistemas de Producción Agrícola de la Cuenca Taquiña. Tesis Maestría Profesional en "Levantamiento de Recursos Hídricos (Manejo y Conservación de Cuencas)" Centro de Levantamientos Aeroespaciales y aplicaciones SIG para el Desarrollo Sostenible de los Recursos Naturales

Berlanga, R.C; Ruiz, A.; Covarrubias, L. y A.Ventura. 2005. Cambios de los patrones de escurrimientos en la Cuenca Lechuguilla-Ohuira-Navachiste, México.

Bryan, R.B. y J. Ploey. 1983. Comparability of soil of soil measurements with different laboratory rainfall simulators.. In Ploey, J. (ed). Rainfall Simulator Runoff and Soil Erosion. Catena Supplement 4. Braunschweig. Pp 56-33

Burkart, R., Cinto J.P., Chébez J.C., García Fernández J., Jager M. y Riegelhaupt E.. 2002. La Selva Misionera: Opciones para su conservación y desarrollo. FUCEMA. 194p.

C.A.R.T.A., 1964. Compañía Argentina de Relevamientos Topográficos y Aerofotogramétricos. Buenos Aires.

Cabrera A.L.. 1976. Regiones fitogeográficas argentinas: Fascículo 1. Tomo II. 2° ed. Enciclopedia Argentina de Agricultura y Jardinería. Buenos Aires. 85p.

Carpena Muñoz, R y A. Rodríguez Ritter. 2005. Hidrología agroforestal. Coedición: Dirección General de Universidades e investigaciones del Gobierno de Canarias. Ediciones Mundi- Prensa.

Cavielir, J & G. Vargas. 2000. Procesos hidrológicos. Ecología y conservación de Bosques Neotropicales. Costa Rica. Cap. 7 Pp. 154-158

Cayo Leonidas Ramos Taipe. 2001 Modelamiento Ambiental para Análisis de Susceptibilidad Erosiva en la Cuenca Media y Alta del Río Cañete y Determinación del Mapa de Erosión (Sistema de Información Geográfica).

Chuvieco, E. 1996. Fundamentos de teledetección espacial. 3a ed. Revisada. Madrid (España), Rialp, S.A. Pp 568.

Colotti, E.. 2001. Aplicabilidad de los datos de lluvia horaria en el cálculo de la erosividad. Fondo editorial de humanidades y educación universidad Central de Venezuela colección académica serie trabajos de ascenso. Venezuela, Caracas.

Devendra, C. and M. Ibrahim. 2002. Silvopastoral systems as a strategy for diversification and productivity. enhancement from livestock in the tropics. Conferencia Magistral.

Ding G. y J.M. Novak. 2002. Soil organic matter characteristics as affected by tillage management. Amarasiwadena D, Hunt PG, Xing B. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66: Pp 421-429.

FAO, 1971. Conceptos y mecanismos de planificación regional aplicable al manejo y desarrollo de cuencas. Seminario Latinoamericano sobre ordenación de Cuencas Hidrográficas. La Plata. Argentina. Pp. 17.

FAO, 1978. El estado Mundial de la Agricultura y la Alimentación. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), Roma, Italia. Pp. 74.

FAO/PNUMA/UNESCO. 1980. Metodología Previsional para la Evaluación de Degradación de los Suelos. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO), Roma, Italia. Pp. 86.

Flaig W.. 1971. Organic compound in soil. *Soil Sci.* 111: Pp 19-33.

Founier F..1972 ,Soil Conservation. Nature and Environment Series. Council of Europe.

Freaza M.A.. 2.000. Economía de Misiones: aspectos y actividades relevantes. Período 1980-1999. Ministerio de Cultura y Educación. Universidad nacional de Misiones. Facultad de Ciencia Económicas. Editorial Creativa. Posadas, Misiones. Pp 219.

Frey, G.E., Fassola, H.E., Pachas, N., Colcombet, L., Lacorte, S.M., Cubbage, F.W. y O.Pérez. 2008. Forestales y Ambientales., 2008. Fac. Cs. Ftales. UNaM, INTA EEA Montecarlo. Eldorado

García Nájera, J. 1962. Principios de Hidráulica Torrencial. Su aplicación a la corrección de torrentes. Madrid. Pp. 350.

Gaspari, F.. 2000. Ordenamiento Territorial en Cuencas Serranas. Aplicación de Sistemas de Información Geográfica. Ediciones Corporativas. Buenos Aires. Argentina.Pp116.

Gasto, J. 1993. En la Agricultura del Siglo XX. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid. España. Pp 47-77.

Gayoso , J. y D.Alarcon. 2001. Componente Ambiental Suelo Universidad Austral de Chile

Godagnone, R.; Ferrao, R & E.Bogado. 1988. Carta de Suelos del Departamento de Leandro N. Alem, Provincia de Misiones. INTA. Misiones.

Grunwald, S. & H.Frede. 1999. Using the Modified Agricultural Non-point Source Pollution Model in German Watershed. *Catena*, Pp 37: 319-328

Hamilton, L.S. & P.N. King. 1983. Tropical Forested Watersheds. Hydrologic and Soils Response to Major Uses or Conversions. Westview Press. Boulder. Colorado. Pp168.

Hardjono, H.W. 1980. Influence of a permanent vegetation cover on streamflow. In: Proceedings of the Seminar on Watershed Management, Development and Hydrology, Surakarta, Indonesia, Pp 280—297.

Henaos, J.E. 1988. Introducción al manejo de cuencas hidrográficas. Universidad de Santo Tomás. Bogota. Colombia. Pp395.

Honorato, R., Barrales, L., Peña I. y F.Barrera. 2001. Evaluación del Modelo USLE en la Estimación de la Erosión en seis localidades entre la IV y IX región de Chile. Universidad Católica de Chile. Facultad de Agronomía e Ingeniería Forestal. Departamento de Ciencias de los Recursos Naturales. Santiago. Cien. Inv. Agr. 28(1) Pp-14.

Huson, N.W. 1971 Soil Conservation. Cornell University Press, Ithaca. New Cork.

Icona-Inteesa, 1981 ICONA (1988). Agresividad de la lluvia en España. Valores del factor R de la ecuación universal de pérdidas de suelo. Servicio de publicaciones del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Madrid.

INDEC. 1991. Censo Nacional Agropecuario 1.988. Resultados Generales, características básicas, Provincia de Misiones (19) Buenos Aires. Pp 46.

INDEC. 1998. Los Municipios de la Provincia de Misiones. Estadísticas básicas. Buenos Aires. Pp 449.

INTA. 2001. Plan tecnológico regional 2001-2003. Centro Regional del INTA Misiones. Pp3.

IPEC. 2002. Información preliminar del censo nacional de Población y Vivienda 2.001.

Irurtia, C y R.Mon. 1994. Microsimulador de Lluvia para determinar infiltración a campo. INTA. Buenos Aires.

Lal, R.. 1986. Soil surface management in the tropics for intensive land use and high and sustained productivity. Adv. Soil Sci. 5 Pp 1-109.

Ligier H.D., Polo H.L. y H.R. Matteio.1989. Erosión hídrica potencial en la provincia de Misiones; aplicación de la ecuación universal de pérdida suelos al mapa edafológico de la provincia de Misiones: Escala 1:50.000. EEA INTA Corrientes – Equipo de Relevamiento de Suelos – PNUD (Proyecto Arg. 85-019). Corrientes. Pp 48.

Ligier, D., Metteio, H. y H.L.Polo. 2002. Erosión Hídrica Potencial en la Provincia de Misiones recurso naturales E.E.A. INTA Corrientes

López Cadenas de Llano, F. 1998. Restauración Hidrológico Forestal de cuencas y control de la erosión. TRAGSA. Madrid. España. Pp.945.

López F., R. 1991. Erosión y productividad del suelo. Centro Interamericano de Desarrollo Integral de Aguas y Tierras (C.I.D.I.A.T.). Serie: Suelos y Clima. SC-66. Apartado 219. Mérida, Venezuela. Pp. 45.

López, R. 1988. La Degradación y Pérdida de los Suelos Agrícolas. Serie Suelos y Clima: SC –65. CIDINT. Venezuela

Lundgern B, P K R Nair. 1958. Agroforestry for soil conservation. In S A El-Swaify, W C Modenhaurer and A Lo (eds) Soil erosion and Conservation. Ankenly IA, Soi Conservation Society of American: 703 .11

Mancini,F, Sanesi, G. y S.Laserre. 1964. Informe edafológico C.A.R.T.A.. Compañía Argentina de Relevamientos Topográficos y Aerofotogramètricos. Buenos Aires Argentina,

Manghi, E.; Bono,J.; Montegro, C.;Parmuchi, G.;Strada, M.; Brouver, M. y M.Stamati. 2002. Mapa Forestal Provincia Misiones Dirección de Bosques Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable.

Marchesini, E.y L.Lucarelli. 1964. Informe geológico C.A.R.T.A. Compañía Argentina de Relevamientos Topográficos y Aerofotogramétricos. Buenos Aires Argentina,

Margalot, J.. 1994. Geografía de Misiones.. Buenos Aires. 6° ed. Pag. 261

Mármol, L A. 2006. Introducción al Manejo de Cuencas Hidrográficas y Corrección de Torrentes. Universidad Nacional de Salta Facultas de Ciencias Naturales Escuela de recursos naturales

Mathur, H.N. y S.S.Sajwan. 1978. Vegetation characteristics and their effect on runoff and peak rates from small watersheds. Indian Forester 104.Pp 398—406.

MEyRNR. 2002 Ministerio de Ecología y Recursos Naturales Renovables de la Provincia de Misiones. El Parque Provincial de la Sierra "Ing. Raúl Martínez Crovetto". Sitio web: www.misiones.gov.ar/ecologia

Microsoft ® Encarta ® 2006. © 1993-2005 Microsoft Corporation. Reservados todos los derechos.

Mintegui Aguirre J. A. y F.López Unzú. 1990. La Ordenación Agrohidrológica en la Planificación. Victoria-Gasteiz. Ed. Servicio Central de Publicaciones del Gobierno Vasco. Pp. 306.

Mintegui Aguirre, J.A.. 1986. La Erosión en la Sedimentación de la Albufera. Monografías I. España.

Mintegui Aguirre, J.A.; Robredo Sánchez, J.C. y P.J.Sandra Arce. 2003. Avenidas Torrenciales en el Arroyo del Partido y su incidencia en la Marisma del Parque Nacional de Doñana. Naturaleza y Parques Nacionales. Serio Técnica. Organismo Autónomo Parques Nacionales. Pp.373.

Moscatelli, G., 1989. Altas del suelo de la República Argentina. Provincia de Misiones Escala 1:500.000. INTA.Corrientes

Nash,J. E.& J. V. Sutcliffe. 1970. River Flow Forecasting through Conceptual Models Part I – A Discussion of Principles. Journal of Hydrology, 10:Pp 282-290.

Olinuck J.A.. 2.002. Informe agrometeorológico de la localidad de Cerro Azul – Año 2.001. EEA INTA Cerro Azul, Misiones Argentina. Miscelánea N° 48.

Oñate, F. 2005. Aplicación del Procesamiento digital de Imágenes Landsat para la Determinación del Número de Curva (CN) en la Cuenca Alta del Río Catamayo. Ecuador.

Pérez, M. Agricultura Ecológica. 2001. Apartados del 1 al 3. Disponible en web. http://www.infoagro.com/agricultura_ecologica/agricultura_ecologica17.asp#3.-%20MATERIA%20ORGANICA%20Y%20ESTRUCTURA%20DEL%20SUELO

Pritchett, W. 1991. Suelos Forestales y Ciclo hidrológico Suelos forestales Propiedades, conservación y mejoramiento. Cap. 9 Pp 193-212.

Reyes, G.; Sosa, D.; Houriet, J., y M. Correa. 2005. Diagnostico ambiental del Departamento Leandro N. Alem. Misiones

Rodríguez, B.; España, M. y E. Caberes de Bisal. 2004. Propiedades químico-estructurales de la materia orgánica del suelo en un agro sistema de los llanos centrales venezolanos bajo diferentes prácticas de manejo. INCI, vol.29, no.8, Pp 461-467.

Rojas, A. y A. Conde. 1985. Estimación del factor R de la Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo para el centro-este de la Rep. Argentina. Ciencia del Suelo, Vol. 3-1,2.

Smith, R.E. y D.F. Scott. 1992. The effects of afforestation on low flows in various regions of South Africa. Water SA 18, Pp 185—194.

Tchilinguirian, P.; Guirin, A y L. Genovesi. 2003. Método de Evaluación y Mitigación del Riesgo de Erosión Aplicado a Poliductos en Ecosistemas del Monte Patagónico. VII Congreso de Petróleo y Gas. Buenos Aires, Argentina.

Teruggi, M.E.. 1955. Los basaltos tholeíticos de Misiones. Notas Museo de La Plata, XVIII (70): Pp 272-277.

Waterloo, M.J.. 1994. Water and Nutrient Dynamics of Pinus caribaea Plantation Forests on Former Grassland Soils in Southwest Viti Levu, Fiji. PhD Thesis. Faculty of Earth Sciences. Vrije Universiteit, Amsterdam

Wischmeier, W. H. y D. D. Smith. 1978. Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning. United States Department of Agriculture (USDA). Agriculture Handbook Nº537. Washington. USA. Pp. 51.

Woomer P.L., Martin A., Albrecht A., Resck D.V.S. & H.W. Scharpenseel. 1994. The importance and management of soil organic matter in the tropics. En Woomer PL, Swift MJ (Eds.) *The Biological Management of Tropical Soil Fertility*. Wiley. Londres, RU. Pp. 47-80.