



Universidad de Pinar del Río

“Facultad de Geología y Mecánica”

Dpto. de Geología

Trabajo de diploma

Título: Comportamiento Hidrológico de la Cuenca San Diego-Bermejales

(Tesis en opción al título de “Ingeniero Geólogo”)

Autor: Bruno Eddy Lima Madre Deus

Tutor: “Dra. Rebeca Hernández Díaz”

Pinar del Río. 2009

“Año del 50 aniversario del Triunfo de la Revolución Cubana”

Pensamiento:

“...la ayuda prestada por los científicos de todos los países ha sido fundamental y ha dejado dos enseñanzas preciosas: el de la técnica que poseen y el de la solidaridad que conlleva. Nuestra joven revolución, como una esponja, ávida de todos los conocimientos de todas las partes del mundo, se impregnará en los anchos cauces de la ciencia socialista para repartirla, en el momento oportuno.”

Comandante Ernesto “Che” Guevara



PÁGINA DE ACEPTACIÓN

Presidente del Tribunal

Secretario

Vocal

Ciudad y fecha:



DECLARACIÓN DE AUTORIDAD

Declaro que soy autor(a) de este Trabajo de Diploma y que autorizo a la Universidad de Pinar del Río, a hacer uso del mismo, con la finalidad que estime conveniente.

Firma: _____



Bruno Eddy Lima Madre Deus
brunomadredeus@yahoo.com

“Bruno Eddy Lima Madre Deus” autoriza la divulgación del presente trabajo de diploma bajo licencia Creative Commons de tipo **Reconocimiento No Comercial Sin Obra Derivada**, se permite su copia y distribución por cualquier medio siempre que mantenga el reconocimiento de sus autores, no haga uso comercial de las obras y no realice ninguna modificación de ellas. La licencia completa puede consultarse en: <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.5/ar/legalcode>

“Bruno Eddy Lima Madre Deus” autoriza al Departamento de Geología adscrito a la Universidad de Pinar del Río a distribuir el presente trabajo de diploma en formato digital bajo la licencia Creative Commons descrita anteriormente y a conservarlo por tiempo indefinido, según los requerimientos de la institución, en el repositorio de materiales didácticos disponible en: <ftp://geologia.upr.edu.cu>

“Bruno Eddy Lima Madre Deus” autoriza al Departamento de Geología adscrito a la Universidad de Pinar del Río a distribuir el presente trabajo de diploma en formato digital bajo la licencia Creative Commons descrita anteriormente y a conservarlo por tiempo indefinido, según los requerimientos de la institución, en el repositorio de tesis disponible en: <http://revistas.mes.edu.cu>



Agradecimientos:

A mis tres hermanos, Keidy Lima Madre Deus, Sergio L. M. D. y Marcia Patricia L. M. D. y mi madre Maria do Céu Lima Pimentel por haberme querido y depositado sus confianzas en todos los tiempos.

A mi tutora Dra. Rebeca Hernández, a los compañeros Roberto Peláez García y Nelson González, a mis profesores Msc. Robert Ramírez, Dr. Dámaso Cáceres, MsC. Orestes Díaz y al Departamento de Geología de la Universidad de Pinar del Río, les debo este momento y mi vida profesional.

A Abdul Pereira, Hersoled dos Santos, Wanderley Lima, Iva Cravid y a todos mis amigos por sus compañías en los tiempos difíciles pasados en esa carrera de mi vida y por los buenos momentos pasados juntos.

A la Revolución y al Pueblo Cubano por haberme aceptado como un miembro más en su sociedad y la oportunidad de seguir mis estudios. Aquí de corazón va mi eterna gratitud a este pueblo por todo que ha hecho por la humanidad y los pueblos del tercer mundo...en especial para mi África.

...en fin soy lo que soy hoy porque me he apoyado en los hombros de todas las personas que han pasado en mi camino de forma positiva o negativa. Les doy las gracias porque estoy dichoso de todo lo que me han apoyado para culminar este trabajo.



Dedicatoria:

Dedico este trabajo a mi familia: mi madre y mis hermanos y en especial a mi padre Manuel Argentino Madre Deus.



Resumen:

La Cuenca del Río San Diego es el principal punto de descarga natural del sistema acuífero carbonatado de la Sierra de la Guirra (Sierra de Rosario, Pinar del Río, Cuba). Se caracterizó la respuesta hidrodinámica e hidrológica de este río a partir del procesamiento de datos de caudal, evapotranspiración, temperatura y escorrentías, con respecto a las precipitaciones ocurridas durante el periodo de estudio a nivel mensual de 2001-2006, incluyendo el periodo más detallado a nivel diario de Octubre-Diciembre 2004. Se realizó un análisis previo de los datos obtenidos en las referidas estaciones, para agruparlas, verificar su consistencia mediante el análisis de regresión lineal simple. El estudio muestra que el sistema drenado es un sistema carbonatado cárstico de respuesta inmediata, porque incluso las pequeñas precipitaciones aumentan inmediatamente la respuesta del caudal. Esto indica que el efecto filtro que el sistema ejerce sobre ellas es insuficiente.

Conocidos los valores de precipitación y evapotranspiración, se determinaron los valores mensuales del escurrimiento superficial, mediante la aplicación de la ecuación de balance hídrico. A nivel mensual en el río, en cuestión presenta una precipitación media areal de 160,87 mm y una evapotranspiración media de 105,43 mm, lo que significa que la cuenca satisface a las demandas de agua.

PALABRAS CLAVES:

Acuífero, Hidrograma, Drenaje

Abstract

The basin of the river of San Diego is the principal point of the natural discharge of the carbonated aquifer system of Sierra de la Guirra (Sierra del Rosario, Pinar del Río Cuba). It is characterized by the hydrodynamic and hydrologic result of the river by the processing of data of the river's flow, of its evapo-transpiration, of its temperature and of its water flow, with respect to the recorded precipitation during the period of study on a monthly scale from the year of 2001-2006, It included the most detailed period of the a daily scale from the 1st October until the 31st December 2004. It was realized that the previous analysis of the obtained data in the referred stations was to gather it, to verify its consistency by the simple lineal regression analysis. The study shows that the drainage system is karstic carbonated with immediate response because even the low precipitations automatically elevates the response of the flow. This demonstrates that the filtered effect



Comportamiento hidrológico de los flujos que drenan la cuenca de San Diego-Bermejales
Bruno Eddy Lima MADRE DEUS

that the system makes open is insufficient. Once the precipitation and evapo-transpiration are known, it was able to determinate the monthly value of the water's flow by the application of the hydric balance equation. At a monthly level this river presents one medium area precipitation of approximately 160,87 mm and a medium area evapo-transpiration of 105,43 mm. It signifies that this basin satisfies the water demand.

Key Words:

Aquifer, Hidrograma, Drainage



INDICE

<u>Cap.</u>	<u>Tabla de Contenido</u>	<u>Página</u>
*	Introducción.....	9
*	Diseño teórico de la investigación.....	10
1	Antecedentes del tema.....	12
1.1	Introducción.....	12
1.2	Trabajos realizados en la zona de estudios.....	12
2	Características Físico geográficas económicas y geológicas de la región.....	17
2.1	Ubicación de la zona.....	17
2.2	Relieve.....	17
2.3	Red fluvial.....	20
2.4	Clima y suelo.....	21
2.5	Características económicas y vías de comunicación.....	22
2.6	Características geológicas de la región.....	22
2.7	Estratigrafía.....	23
2.8	Magmatismo.....	27
2.9	Tectónica.....	28
2.10	Hidrogeología.....	29
3	Materiales y métodos.....	31
3.1	Introducción.....	31
3.2	Materiales.....	32
3.3	Métodos.....	33
3.3.1	Métodos geológicos.....	33
3.3.2	Métodos matemáticos y estadísticos.....	33
3.3.3	Modelo físico geológico conceptual.....	33
3.3.4	Métodos Hidrológicos.....	34



4	Análisis estadístico.....	37
4.1	Análisis de consistencia de los datos.....	37
4.2	Análisis estadístico.....	40
5	Análisis y discusión de los resultados.....	45
5.1	Análisis geológico.....	45
5.2	Modelo físico geológico.....	46
5.3	Análisis Hidrológico.....	47
5.4	Balance Hídrico Superficial.....	57
*	Conclusiones.....	69
*	Recomendaciones.....	70
*	Tablas y anexos gráficos.....	71
*	Bibliografía.....	80

Tablas

No.

Contenido

- 1 Análisis estadístico elemental de la Subcuenca 1 (Octubre-Diciembre)
- 2 Análisis estadístico elemental de la Subcuenca 2 (Octubre-Diciembre)
- 3 Análisis estadístico elemental de la Subcuenca 3 (Octubre-Diciembre)
- 4 Análisis estadístico elemental de la Subcuenca 4 (Octubre-Diciembre)
- 5 Balance Hídrico mensual (2001-2006) de la cuenca San Diego
- 6 Balance Hídrico superficial ideal anual de la C. San Diego
- 7
- 8 Concentración de los elementos químicos mayoritarios expresados en mg/l
- 9 Concentración de los elementos químicos mayoritarios expresados en meq/l
- 10 Balance hídrico diario (Octubre-Diciembre)
- 11 Propiedades físicas de las surgencias valoradas de la zona de estudio
- 12 Coeficientes de conversión de propiedades químicas de las surgencias de aguas de la zona de estudio
- 13 Temperaturas medias mensuales



No.	Figuras Contenido
1	Esquema de ubicación de la Sierra del Rosario y el área de estudio
2	Mapa de pendiente en grados
3	Mapa topográfico del sector de estudio
4	Red Hidrográfica y límite de la zona de estudio
5	Esquema geológico de la Sierra del Rosario y el área de estudio
6	Diagrama de flujo de los trabajos realizados
7	Grafico de la precipitación acumulada Vs. Caudal acumulado Sub cuenca 1 (sin corregir)
8	Grafico de la precipitación acumulada Vs. Caudal acumulado Sub cuenca 2 (sin corregir)
9	Grafico de la precipitación acumulada Vs. Caudal acumulado Sub cuenca 3 (sin corregir)
10	Grafico de la precipitación acumulada Vs. Caudal acumulado Sub cuenca 4 (sin corregir)
11	Grafico de la precipitación acumulada Vs. Caudal acumulado Sub cuenca 1 (corregido)
12	Grafico de la precipitación acumulada Vs. Caudal acumulado Sub cuenca 2 (corregido)
13	Grafico de la precipitación acumulada Vs. Caudal acumulado Sub cuenca 3 (corregido)
14	Grafico de la precipitación acumulada Vs. Caudal acumulado Sub cuenca 4 (corregido)
15	Grafico de la relación Vs. Caudal
16	Mapa Geológico de la Sierra de Rosario y región de estudio
17	Perfil estratigráfico C'-C'
18	Perfil estratigráfico C'-C''-C''
19	Columna estratigráfica de la zona de estudio
20	Mapa tectónico y estructural de la zona de estudio
21	Hidrograma de la Cuenca San Diego (2001-2006)
22	Grafico explicativo de los periodos de trabajos en la zona
23	Hidrograma de la Cuenca San Diego (Octubre-Diciembre)
24	Hidrograma final sintetizado, anual de la Cuenca
25	Curva de crecida estimada de la cuenca San Diego
26	Curva de agotamiento en la escala mensual
27	Curva de agotamiento de la subcuenca 1
28	Curva de agotamiento de la subcuenca 2
29	Curva de agotamiento de la subcuenca 3
30	Curva de agotamiento de la subcuenca 4
31	Mapa de la variación del pH
32	Mapa de isoconductividad eléctrica del agua superficial
33	Mapa Compuesto de Caudal (isolíneas), precipitación, red hidrografica, zona de recarga y descarga.

Introducción

En los últimos dos decenios, se ha expresado una preocupación creciente por el aumento cada vez mayor de la demanda de este limitado recurso (agua), en los diversos sectores socioeconómicos.

El ciclo hidrológico gobierna caprichosamente la presencia del agua, que es decidida en cada momento por la latitud, altura, vegetación, orografía, temperatura y la influencia de los océanos, así como por el tiempo y las actividades humanas. Pero cuando la disponibilidad del agua es intermitente o cuando su exceso es causa de desastres por inundaciones y avenidas, deslizamientos de terreno y sequías, entonces es necesario contar con esquemas de evaluación de los recursos hídricos adecuados y fiables para hacer frente a estos desafíos.

La zona San Diego-Bermejales, ha sido objeto de estudio para muchos investigadores durante varios años. Esta zona está compuesta fundamentalmente por acuíferos cársticos, estos, constituyen una importante fuente de recursos a escala global, y una de ellas de la que concierne el tema en cuestión es como fuente de aguas minero medicinales. En Cuba, las formaciones geológicas son principalmente de origen carbonatadas.

El estudio de las propiedades físicas y químicas de las aguas de la zona, las rocas que en ellas interactúan brindaron informaciones útiles a la determinación de las características de los elementos acuíferos de la zona.

Estas características fueron agrupadas en tres grupos principales: la geología, hidrodinámica y la hidroquímica.

Con la finalidad de poder responder a la creciente demanda actual y futura de información sobre el agua y los conocimientos necesarios para el desarrollo sostenible, es indispensable conocer el comportamiento de las diversas variables que intervienen en el ciclo hidrológico (precipitación, evapotranspiración, caudal) a través del Balance hídrico superficial. El Balance Hídrico es también de gran utilidad en muchos campos de la investigación. Por ejemplo el conocimiento del déficit de escurrimiento es primordial para comprender la factibilidad de irrigación, ya que provee información sobre el volumen total de agua necesaria en determinada época del año y entrega un valor importante sobre la sequedad. La información sobre los excedentes de agua y la cantidad por la cual la precipitación excede las necesidades de humedad cuando el suelo esta en su capacidad de campo, es fundamental en todo estudio hidrológico, lo cual nos conllevaría a una adecuada planificación y gestión de los recursos hídricos, de tal forma que el desarrollo socioeconómico tenga como base el uso racional y armónico de sus recursos naturales.



Diseño Teórico de la Investigación

Situación Problemática:

La falta de un balance hídrico en las regiones montañosas de Sierra de Rosario, ha traído consigo un mal manejo de los recursos hídricos en estas regiones, manifestándose en la cantidad y la calidad de las aguas disponibles que a su vez causa un cambio de patrón del régimen de circulación de las aguas superficiales y subterráneas.

Problema:

La necesidad de hacer el balance hídrico para la zona de San Diego-Bermejales.

Objeto de Estudio:

La cuenca hidrográfica de San Diego-Bermejales.

Campo de acción:

Uso sostenible de los recursos en la cuenca de San Diego-Bermejales.

Hipótesis:

Con el cálculo del balance de los recursos hídricos de la cuenca San Diego-Bermejales será posible mejorar su equilibrio hídrico, evitar la contaminación y determinar las posibles áreas de descargas y recargas de la región. Con la finalidad de poder responder a la creciente demanda de agua, y garantizar el desarrollo sostenible en las áreas montañosas.

Tipo de investigación:

Descriptiva y aplicativa.



Objetivo General:

Caracterización físico-química de los flujos que drenan la zona de San Diego-Bermejales.

Objetivos específicos:

- Establecer el balance hídrico de la zona de estudio;
- Determinar Zonas de recargas y descarga;
- Aportar al conocimiento de las características hidrodinámicas de la Cuenca Bermejales-San Diego de los Baños a partir del control de las variables pluviométricas, caudales y conductividad.
- Identificar el grado de organización de los acuíferos de la región a partir de la interpretación de los hidrogramas.

Resultados esperados:

- Balance hídrico superficial de la zona de estudio;
- Caracterización de los flujos hidrogeológicos de San Diego-Bermejales:
- Caracterización hidrodinámica
- Caracterización geológica
- Mapas de zonas de recargas y descargas
- Hidrogramas para diferentes periodos: mensual, diario...



Capítulo I: Antecedentes del tema.

1.1 Introducción

Este capítulo consistió en recopilar todas las informaciones disponibles sobre las investigaciones geológicas e hidrogeológicas de la zona de estudio y de su historial como acuífero (tipos de acuíferos que existen, volumen de extracción de agua para el abasto y otros usos...). Todas estas informaciones nos han permitido establecer un modelo conceptual hidrogeológico de la zona a estudiar.

1.2 Trabajos realizados en la zona de investigación

En la región se han realizado trabajos geológicos con diferentes objetivos, principalmente de carácter regional entre los que podemos señalar los siguientes:

A comienzos del siglo XIX, el célebre Sabio Alemán A. Von Humboldt, brindó las primeras informaciones sobre la geología que poseen un carácter particularmente descriptivo.

En 1957 Charles W. Hatten elaboró un esquema estratigráfico y un mapa geológico a escala 1:40 000 que debido a su importancia son actualmente considerados. Elaboró una columna estratigráfica resumen desde el jurasico al paleógeno de la provincia de Pinar del Río donde incluyó las Formaciones Pons, Ancón, Manacas, Azúcar y otras. Muchas de las cuales se describían por primera vez. Sus consideraciones tectónicas se basaron en el desarrollo y estilo técnico de los grandes mantos sobrecorridos,

En el periodo revolucionario, se han realizado levantamientos geológicos importantes, que han abarcado a nuestra región de estudios, uno de ellos fue “Informe para la búsqueda detallada, exploración orientativa de las aguas minero-medicinales San Diego-Bermejales”. Como resultados de estos trabajos se describieron depósitos desde el jurasico hasta el Cuaternario, además de rocas intrusivas y metamórficas, así como se dividieron los depósitos del Jurasico en dos pisos (Formación San Cayetano, subdividida a su vez en subformaciones y las Formaciones Jagua, Viñales y Artemisa y las magmáticas en tres complejos.

El área de estudio ha sido objeto de varios estudios hidrogeológicos, debido a sus importantes fuentes de aguas termales mineromedicinales, donde hay una instalación balnearia de ahí el nombre de la zona “los baños de Bermejales”. (M. Roberto Gutiérrez Domech, 2004)



Desde el punto de vista geológico esta región fue estudiada durante el Levantamiento Geológico escala 1:250 000, realizado por las academias de ciencias de Cuba y Polonia, en la década del 70 y 80, desde el punto de vista carsológico e hidrogeológico poco se ha realizado, salvo el programa PIGEK, desarrollado en la zona del Pan de Guajaibón, también en los 80 y algunos esfuerzos aislados emprendidos sobre todo por espeleólogos que estudian los sistemas cavernarios. En el trabajo “Los cañones fulvio carsicos de Sierra de Rosario” realizado por M. Roberto Gutiérrez Domech, este autor concluyo que algunos de los ríos que nacen en la parte central de las alturas, donde se intercalan rocas vulcanógenas, vulcanógeno-sedimentarias y carbonatadas, en su camino hacia la llanura que bordea por su flanco meridional dichas elevaciones, han excavado angostos y profundos cañones donde se alternan cauces superficiales profundamente encajonados, sumideros y surgencias.

La zona presenta una morfología con predominio de cañones fulviocarsicos que a su vez están formados en los cauces de ríos como el Bacunagua, el Taco Taco, el Santa Cruz, el Manantiales y otros, que pueden presentar cauces subterráneos bajo la zona de aereacion, saltos de agua provocados por rupturas de pendientes en zonas de contactos geológicos y sistemas de galerías subterráneas que están entre los mayores de Cuba.

Otro trabajo realizado vinculado fuertemente con nuestra investigación, se realizó en el área de Sierra de Rosario su objetivo fue evaluar el aprovechamiento y protección de las aguas subterráneas disponibles en los acuíferos cársicos de montañas, la eventual afectación que su aprovechamiento produciría sobre los recursos hídricos superficiales, y argumentar acerca de las posibilidades de captación de estas aguas. Dicha investigación se basó en el análisis del vaciado del acuífero durante el período de estiaje donde, de acuerdo con el grado de penetración del río en el acuífero, este es capaz de mantener un determinado caudal debido, exclusivamente, al aporte de agua subterránea. Este a su vez puede ser así separado y procesado individualmente. Los datos evaluados en la primera análisis, al tratarse de valores mensuales permiten referirse solamente a la hidrodinámica representada por un sólo subrégimen de agotamiento. El período de recesión promedio evaluado fue de Noviembre a Febrero, es decir, de unos 120 días (Molerio. L.F 2003).

La parte de hidroquímica, se fundamenta esencialmente en trabajos de caracterización hidrogeoquímica de los sistemas de flujos que drena los macizos de la Sierra del Rosario, donde los autores J.R. Fagundo Castillo, J. Carrillo Rivera, I. Antigüedad, , P. González R. Hernández, C. Melián Rodríguez, J. Pajón Morejón, M. Suárez Muñoz R. Peláez García.



Demostraron que las propiedades químico-físicas de estas aguas dependen de las interacciones agua-roca durante el tiempo de contacto que media desde la infiltración hasta su surgencia y de la composición de los materiales acuíferos que drenan estas aguas, y que es posible caracterizar los diferentes flujos: locales, intermedios y regionales sobre la base de un grupo de indicadores hidrogeoquímicos.

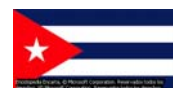
Se ha podido establecer el comportamiento hidrogeoquímico de 8 grupos de aguas seleccionados previamente sobre la base de los diferentes ambientes geológicos drenados. Las características de los diferentes flujos (locales, intermedios y regionales) y sus interacciones con los materiales acuíferos (calizas, rocas ultrabásicas y esquistos y areniscas) fueron interpretadas a partir de los parámetros químico-físicos, relaciones iónicas y otros índices geoquímicos relacionados con el equilibrio de las aguas respecto a los minerales calcita, dolomita y yeso.

En general, se encontraron que las aguas de corto recorrido (flujos locales), poseen en sus emergencias temperaturas frías, un ambiente oxidante, altos valores de Eh y O₂ disuelto. El pH neutro (carbonatos) o pH alcalino (rocas ultrabásicas, esquistos y areniscas), bajo contenido de CO₂ y de minerales disueltos, así como ausencia de H₂S. Durante el año las aguas suelen estar unas veces insaturadas con respecto a la calcita y la dolomita (períodos lluviosos), mientras que en otras ocasiones se encuentran saturadas con respecto a dichos minerales (períodos secos).

Las aguas con un largo y profundo recorrido subterráneo (flujos regionales), por el contrario, poseen en sus surgencias: temperaturas relativamente altas, un ambiente reductor, bajos valores de Eh y O₂ disuelto. El pH es ácido o neutro en muchas ocasiones, elevados contenidos de gases disueltos (CO₂, H₂S, Rn), así como de macro (Cl⁻, SO₄²⁻, Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, SiO₂) y de microcomponentes (F, Li, Sr), cuyas proporciones recíprocas varían en dependencia del material acuífero y de las capas menos permeables con las cuales interactúan. Tienden a encontrarse saturadas o sobresaturadas con respecto a la calcita, la dolomita y cerca de la saturación respecto al yeso.

Se probó que las aguas con un recorrido de extensión y profundidad intermedio entre las dos anteriores (flujos intermedios) poseen parámetros químico-físicos e índices hidrogeoquímicos cuyas magnitudes son intermedias entre ambos tipos de aguas.

Los estudios realizados por *Norberto Díaz Rivero, Carlos E. Valdés Moreira y Kelma Zubiaur Chapman*, muestran que el área de la Sierra del Rosario se encuentra dividida en dos grandes estructuras regionales, Bloque Norte y Bloque Sur, que de forma general existe una evidencia de movimientos neotectónicos en el área.



Existe un drenaje central, definido por el parte agua de dirección sudoeste-noreste, ubicado hacia el centro del área, organizando la esorrentía hacia el norte y el sur de la región.

Existe una estrecha relación entre la litología y el drenaje, observándose redes dendríticas y radiales en Formaciones terrígenas como Capdevila y terrígeno – carbonatadas como Universidad y Guanajay. Mientras que en Formaciones cársticas como Cojímar y Jaruco vemos un menor desarrollo de la red con tendencia a la infiltración.

Desde el punto de vista estratigráfico, en el área se presentan varias Formaciones cuyas edades oscilan entre el Jurásico y el Cuaternario con una variabilidad litológica caracterizadas por materiales terrígenos, terrígenos carbonatados y carbonatados, cuyos contactos en superficie se desarrollan en la dirección de los esfuerzos principales suroeste – noreste.

El análisis y procesamiento del Modelo Digital del Terreno, permitió definir un conjunto de alineaciones y estructuras disyuntivas, corroborándose así las estructuras dadas por otras investigaciones. Y permitiéndonos delimitar otras nuevas. Se establecieron las direcciones fundamentales flujo en dirección suroeste-noreste y sureste-noroeste.

En la zona de Bermejales y San Diego de los Baños donde hay manifestaciones de aguas mineros medicinales, se carece de estudios detallados del comportamiento hidrológico, hidrogeológico. La geología tiene un estudio preliminar con los trabajos realizados por Moreno, A.M.; Peláez, R. y Romero, J., 2003, confeccionaron por primera vez para el yacimiento de aguas mineromedicinales de San Diego de los Baños un Modelo Hidrogeológico Conceptual que lo caracteriza:

- Se establece que hasta la profundidad de 60,0 m solamente existen aguas del “fondo” natural del tipo bicarbonatadas cálcicas con un nivel freático de 8.5 m de profundidad.
- El acuífero contenedor de las aguas mineromedicinales, sulfatadas, cálcicas, sulfuradas y otras, se vincula con la zona de Falla Regional Pinar que al atravesar las calizas agrietadas y carsificadas de la Formación Artemisa de edad $J_3-K_1^{ar}$ se “derraman” por su sistema de falla secundario, llegando a constituirse los manantiales del Balneario y los del cauce del río en la zona de descarga natural de esta agua.



- Al sur de la Falla Pinar no aparecen las aguas mineromedicinales por estar todo el corte cubierto por los depósitos impermeables de las Formaciones Capdevila y Los Negros.

- La génesis de las aguas mineromedicinales es meteórica, de infiltración hasta los 1.5-2.0 Km. de profundidad donde debido a la presencia de materiales carbonosos, sulfuros diseminados en el corte y procesos hidrogeoquímicos de transferencia de masas se enriquecen los sulfatos, los cuales son reducidos a posterior, por bacterias sulforeductoras hasta sulfhídrico.

Posteriormente se hizo una investigación que vendría a complementar este modelo hidrogeológico conceptual. El MSc. Ing. Pablo de Jesús Cervantes González y la MSc. Ing. Ángela Manchado Martín llegaron a la conclusión que:

El Sistema Geotérmico San Diego de los Baños tiene un control tectónico. Está asociado a la Falla Pinar, activa, de carácter profundo hasta alrededor de 20 km y con una potencia entre 3 – 4 Km.

El Sistema Geotérmico San Diego de los Baños está asociado a una zona de elevado gradiente del campo gravitatorio la cual mapea en superficie la zona de la Falla.

El Sistema Geotérmico San Diego de los Baños está asociado litológicamente a rocas terrígeno-carbonatadas. En el área de desarrollo del mismo convergen diferentes Formaciones geológicas: Formación San Cayetano, Formación Loma Candela, Formación Capdevila y Formación Artemisa. Las rocas carbonatadas de la Formación Artemisa constituyen el acuífero del reservorio de aguas mineromedicinales y termales.

El Sistema Geotérmico San Diego de los Baños se manifiesta por un gradiente geotérmico anómalo de hasta $61\text{ }^{\circ}\text{Ckm}^{-1}$. La extensión del reservorio del Sistema Geotérmico San Diego de los Baños puede alcanzar hasta unos 30 – 50 km, desde San Diego de los Baños hasta Soroa, a través de la Falla Pinar. (González P. J. C. y Martín Á. M. 2004)



Capítulo II: Características Físico geográficas económicas y geológicas de la región

2.1. Ubicación de la zona

El área del trabajo comprende el NW de los Baños de Bermejales hasta el poblado de San Diego de los Baños, abarcando a todo lo largo del Río San Diego.

Al suroeste se localiza el pueblo de Consolación del Sur y al sureste el de los Palacios. El área estudiada pertenece a la provincia de Pinar del Río, Municipio de los Palacios y se localiza en las hojas cartográficas E 1:50000 Herradura (3583-1V) y Pan de Guajaibon (3584-III).



Figura 1. Esquema de ubicación de la Sierra del Rosario y el área de estudio

2.2. Relieve

La Zona de estudio ocupa unos 18,125 km² del municipio de la provincia pinareña Los Palacios, en la falda sur. Su cima principal es el Pan de Guajaibón con 692 m de altitud.

El relieve de la región está constituido por impresionantes elevaciones cársticas de calizas (mogotes) con formas de cúpulas de laderas verticales, así como por sierras y colinas pizarrosas, entre los que se encierran valles llamados llanuras cársticas marginales. Las colinas pizarrosas se caracterizan por un relieve de cimas redondeadas y laderas con variadas pendientes muy erosionadas. Hay presencia del fenómeno cárstico en el relieve superficial como diente de perro, dolinas, etc.

Las cotas en toda el área, calculadas según el modelo digital del terreno a través del Surfer 8, oscilan entre los 50-200 m esto caracteriza a un relieve ondulado y de

pendientes abruptas, que en dirección al poblado de San Diego de los Baños se hacen más suaves y el relieve más llano.

Los valores de pendiente varían de 0-70°. En la zona sur el valor de la pendiente es de 0-5° y la zona norte llega hasta los 70°. Las zonas se encuentran separadas tectónicamente por la falla Pinar. Fig. 2

La vegetación en el área está en correspondencia al tipo de suelo y al relieve, predominando en las colinas pizarrosas de la Formación San Cayetano grandes bosques de pinos, en los mogotes de la Formación Artemisa se desarrollan árboles típicos del Carso cónico, en las zonas más bajas(llanas) se encuentran fundamentalmente arbustos espinosos y frutos menores.

Mapa de pendiente y orden de los ríos obtenido a través del modelo digital del terreno:

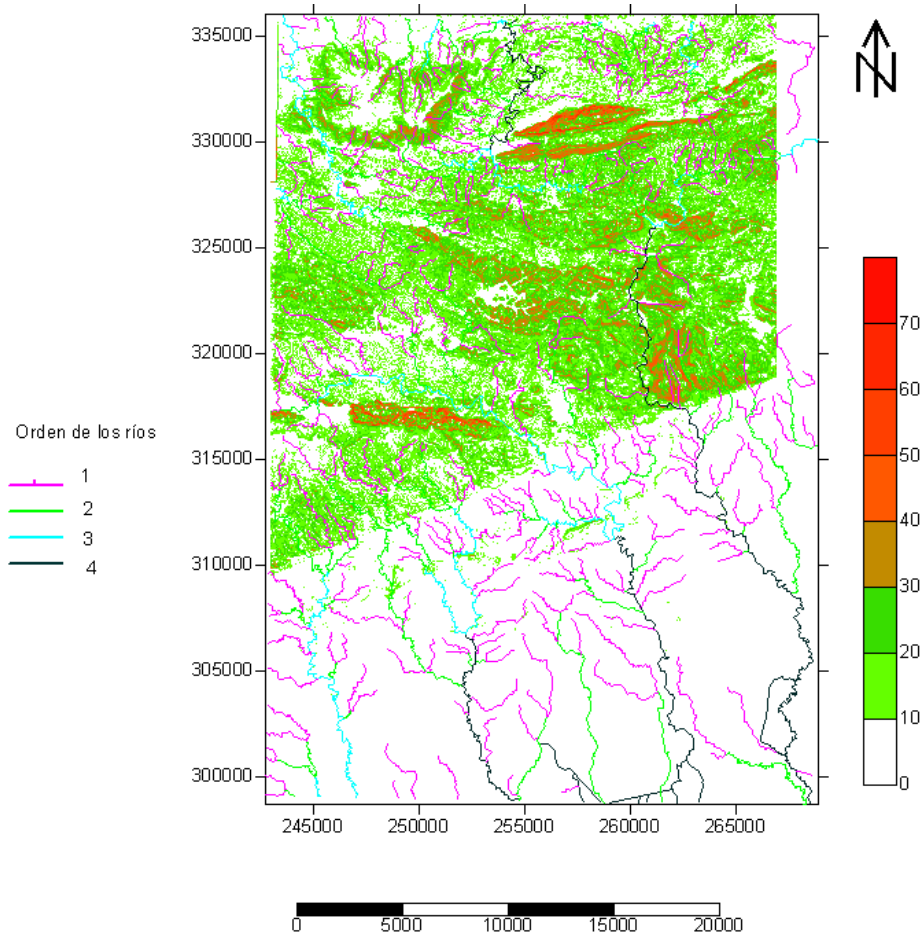


Figura 2. Mapa de pendiente y orden de los ríos.

Desde el punto de vista del tipo genético de relieve esta región, así como toda la cordillera puede clasificarse como de “horst y bloques en mantos de sobrecorrimiento”, con montañas bajas, fuertemente diseccionadas, con valores de disección vertical, que varían entre 300 y 500m.

Comportamiento hidrológico de los flujos que drenan la cuenca de San Diego-Bermejales
Bruno Eddy Lima MADRE DEUS

A continuación se presenta, el mapa de topográfico obtenido a partir del modelo digital del terreno:

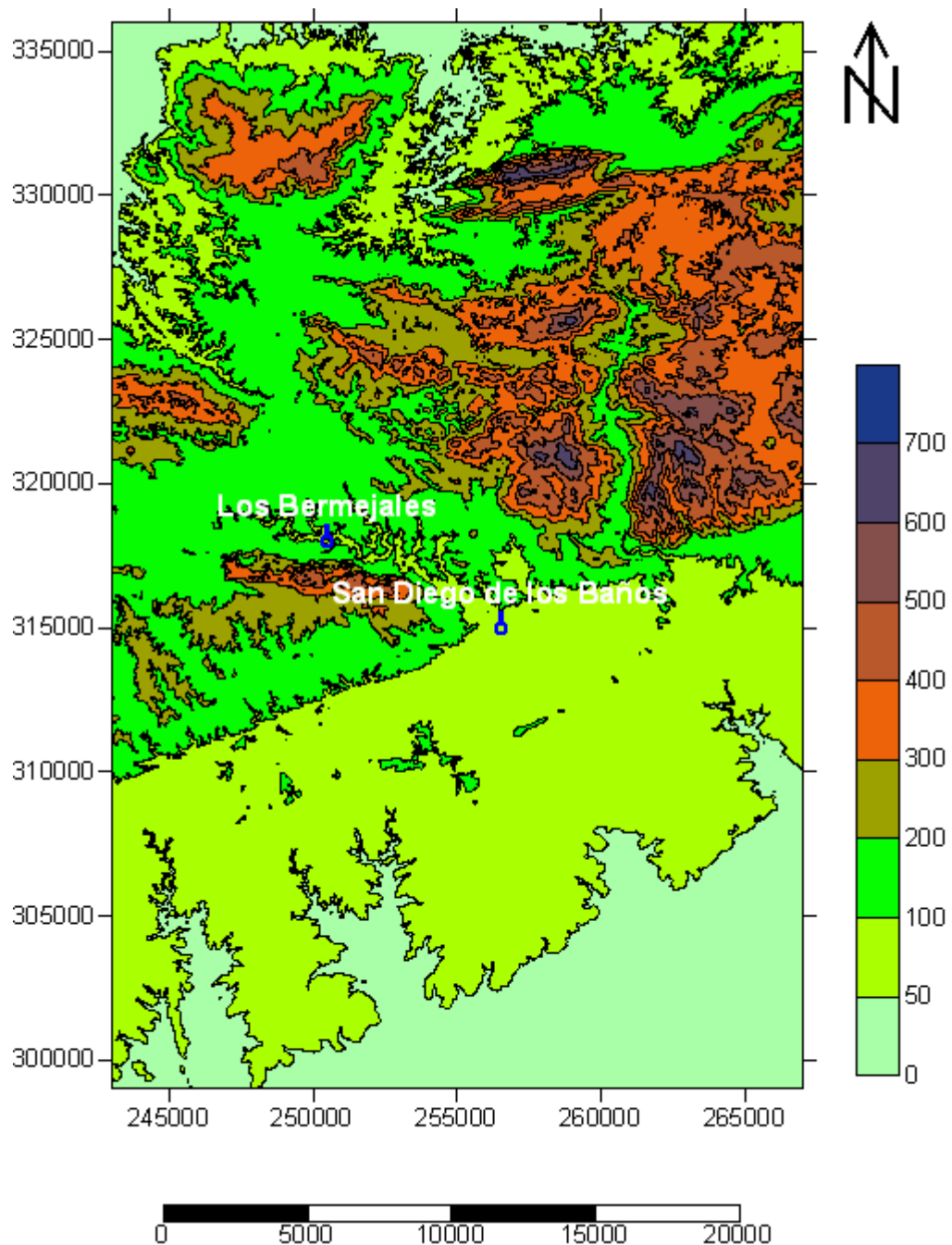


Figura 3. Mapa topográfico del sector San Diego-Bermejales

Las superficies de nivelación más antiguas son del Mioceno Inferior, según el criterio de la mayoría de los especialistas y se conservan como relictos desprovistos de sedimentos o como superficies con el desarrollo del carso, la modelación de sus formas más características, entre todas destacándose los sistemas poligeneracionales de cavernas.

2.3 Red Fluvial

Dentro de los tipos de redes de drenaje en el área. Están presentes el drenaje en forma *dendrítica* y el drenaje *paralelo* (fig.4). A la vista de esta figura se observa que las corrientes sobre las áreas de la zona sur en un número sucesivo de casos, fluyen casi paralelas unas a otras. Este tipo de drenaje existe en la región en zonas donde existen controles

e estructurales que motivan en espaciamiento regular, casi paralelo, de las corrientes fluviales, e implica “pronunciadas pendientes regionales, o pendientes pronunciadas por rasgos topográficos paralelos, o control de estructuras paralelas falladas”.

Ocasionalmente, fallas paralelas pueden originar crestas y valles paralelos, con el consiguiente drenaje de configuración “paralela”, en diversas formas.

En general aguas debajo de los frentes montañosos, si no se encuentran controlados por otros rasgos estructurales, los valles consecuentes no mostrarán, probablemente los cambios de curso en ángulo recto, tan comunes en la configuración “enrejada” y se desarrollarán paralelamente, descendiendo por las pendientes de los macizos de las montañas. Se asemejan estas corrientes a las de tipo enrejando. Pero no deben confundirse con ellas.



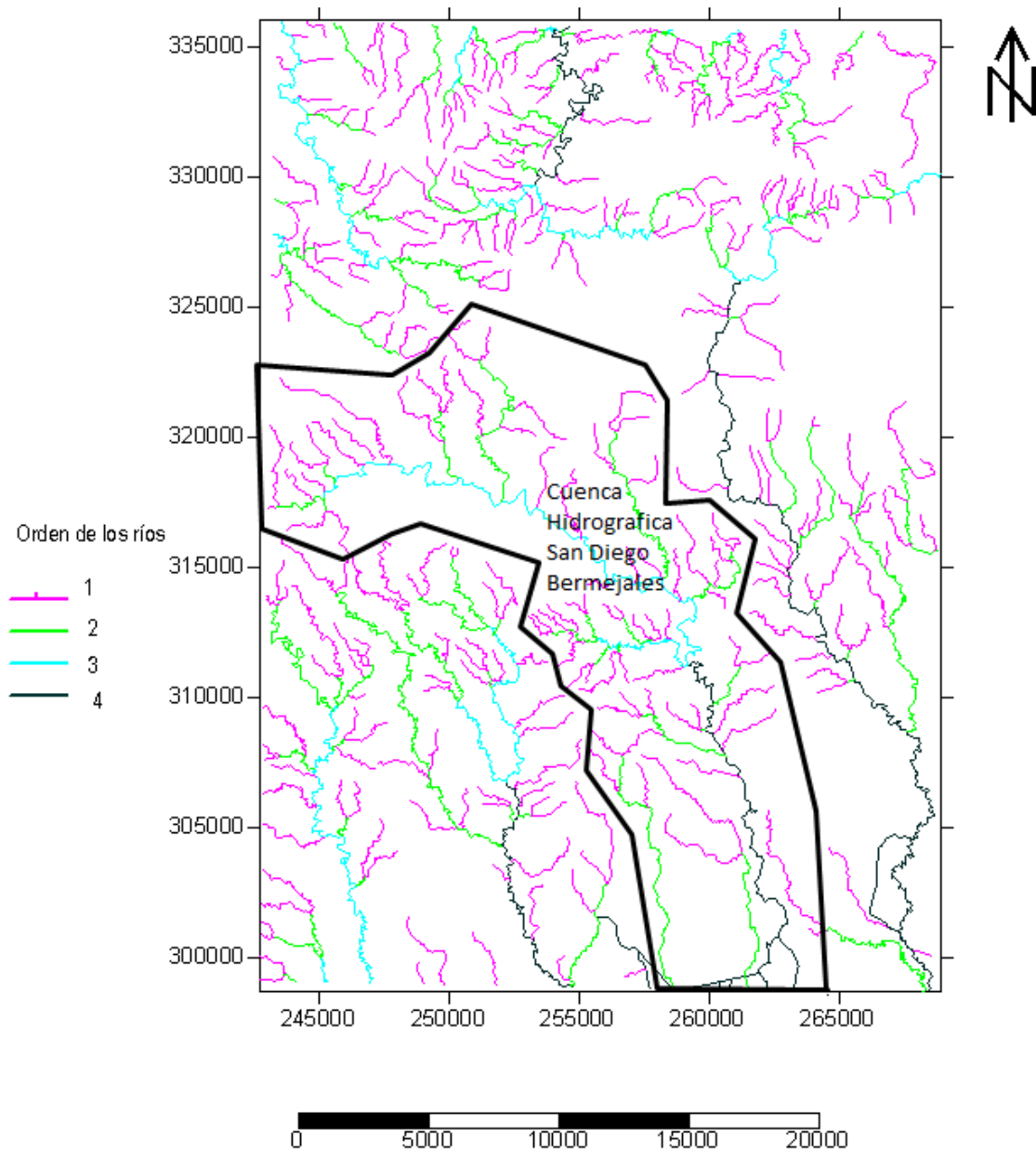


Figura 4: Red hidrográfica y límite de la zona de estudio

2.4Clima y suelo

La temperatura media anual del aire está entre 22 y 24 grados centígrados. En los meses de invierno varía entre 18 y 20 grados.

La evaporación media anual es de las más bajas del archipiélago (1265,18mm).

Los suelos de esta región son fundamentalmente Ferralíticos Rojos Típicos y Poco Evolucionados, con matorrales secundarios y bosques semidecíduos mesófilos y Esqueléticos Naturales, alternándose con Pardos sin carbonato típicos, con altos valores de erosión potencial. Hacia la porción nororiental se localizan alturas de rocas sedimentarias carbonatadas y terrígeno-carbonatadas, con suelos de tipo húmico



carbonático, pardo con carbonatos y pardos sin carbonatos. Desde el punto de vista de la agroproductividad los suelos se consideran poco productivos, limitados por las pendientes y la erosión potencial, pero en el flanco sur de las serranías se localizan suelos medianamente productivos.

2.5 Características económicas y vías de comunicación

La explotación forestal y el turismo de salud, de forma potencial, constituyen las principales fuentes de desarrollo de la región, considerando el cultivo de frutos menores como básico para el autoconsumo de los pobladores, muy dispersos.

El café actualmente aporta la mayor fuente de riqueza a la región, desde el punto de vista agrícola.

El centro turístico de La Güira (Reserva histórico-turística), es el principal. Dentro de el se encuentra la Cueva de los Portales (Monumento Nacional), un sector subterráneo del curso del Río San Diego, que tiene el atractivo especial de haber sido el puesto de mando del Guerrillero Heroico, Comandante Ernesto “Che” Guevara, durante la Crisis de los Mísiles, en 1962. El ya mencionado balneario de aguas sulfurosas de San Diego de los Baños tiene un bien ganado prestigio internacional por sus tratamientos.

Entre las vías de comunicación se destacan la carretera central y la autopista nacional, al sur de la región de los trabajos que facilitan el acceso a través de una carretera de segundo orden, al poblado de San Diego de los Baños, pero a partir de aquí el acceso al área de los trabajos es difícil, a través de terraplenes, caminos y triillos que en épocas de lluvias son intransitables y en general en malas condiciones. Por lo planteado, es posible decir que el acceso al sector San Diego puede considerarse de satisfactorio, sin embargo al sector Bermejales el acceso es malo. Se puede llegar por Galalón.

2.6 Características geológicas de la región

La geología de la Sierra del Rosario se caracteriza por una complejidad litológica y estructural, como consecuencia del desplazamiento y transporte tectónico de rocas ocurrido durante el Eoceno Medio (Pszczoiowski, 1978). En el área se aprecian tres unidades fisiográficas principales paralelas e intercaladas entre sí, constituidas por calizas, esquistos, areniscas y rocas ultrabásicas. Están limitadas al sur y al oeste por las fallas Pinar y otras fallas respectivamente. Estas características morfológicas hacen que las aguas almacenadas por las secuencias más permeables emergen en los contactos con las menos permeables, originando arroyos y ríos que vierten sus aguas al



Comportamiento hidrológico de los flujos que drenan la cuenca de San Diego-Bermejales
Bruno Eddy Lima MADRE DEUS

Golfo de México (ríos San Marcos, Bahía Honda y Nazareno) o hacia el Mar Caribe (ríos Caiguanabo, Los Palacios, Santa Cruz, San Cristóbal, Bayate y San Juan).

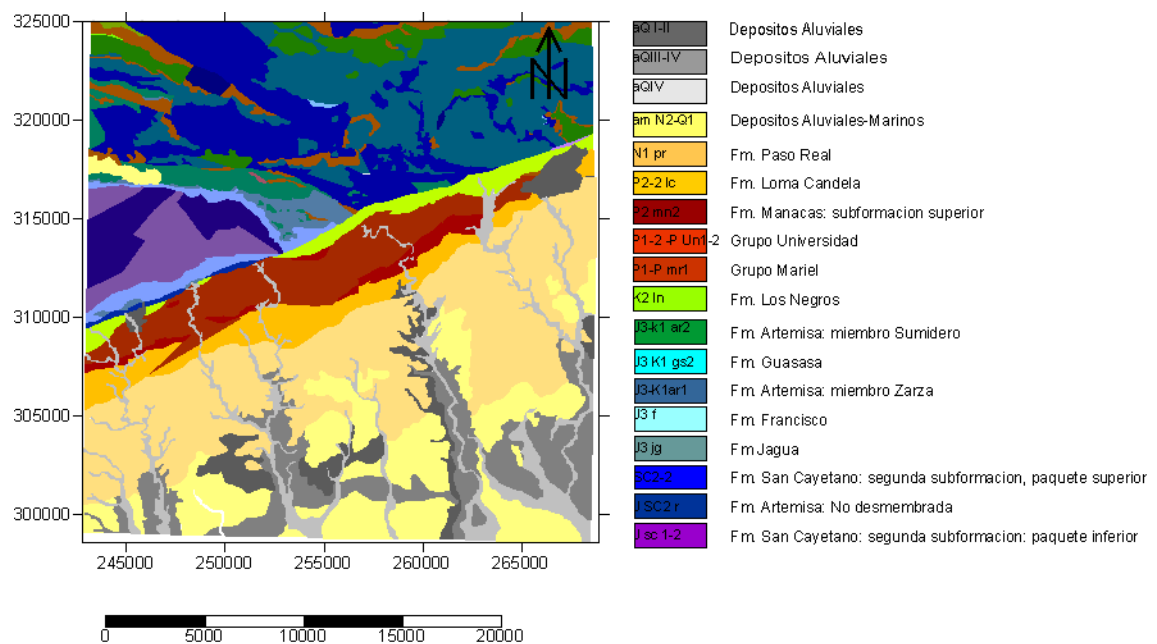


Figura 5. Esquema geológico de la Sierra del Rosario y el área de estudio

Las unidades geológicas que afloran en el área se describen ligeramente a continuación desde las más antiguas hasta las más recientes figura 5. La caracterización general de las mismas es complementada por una descripción litológica tomada de los análisis efectuados durante los trabajos de prospección en el área.

2.7 Estratigrafía

El sector está enmarcado en la ZEF (Zona Estructuro Facial) Sierra del Rosario. Dentro de ésta última, los depósitos están representados principalmente por las secuencias terrígenas de la Formación San Cayetano y Francisco, así como los depósitos carbonatados de la Formación Artemisa.

Los sedimentos han sido agrupados en unidades litoestratigráficas, de las cuales las principales son las Formaciones San Cayetano, no carbonatada, así como las calcáreas: Artemisa, Francisco, principalmente.

La mayor parte del territorio está ocupada por alturas de rocas sedimentarias carbonatadas, intercaladas con otras efusivo y efusivo-sedimentarias. Hacia el noroeste se

destaca un territorio con alturas en forma de altiplanicie, modelado en rocas ultrabásicas con fuerte contenido de lateritas ferroniquelíferas.

En la zona de estudio hay presentes nueve Formaciones cuyas descripciones, de la más antigua hacia la más joven, se tomaron a partir del léxico estratigráfico (Guillermo L. Franco Álvarez, 1994):

1. Formación San Cayetano,

Litología diagnóstica: Intercalaciones de areniscas grises oscuras de grano fino y medio con lutitas y limolitas arcillosas grises o grises oscuras. Al intemperizarse toman colores rojizos y carmelitosos.

Edad: Jurásico Inferior- Jurásico Superior (Oxfordiano Medio).

Ambiente de sedimentación: Se depositó en un mar somero, influenciado por sedimentación deltáica. En la secuencia de la Sierra de los órganos, la sedimentación carbonática comenzó, mientras todavía se acumulaban depósitos terrígenos.

Espesor: No sobrepasa los 6 000 m.

Observaciones: La composición litológica de la formación es bastante variada y en diferentes perfiles las secuencias litológicas son distintas. Además, las complejas relaciones estructurales, en muchos casos, no permiten establecer categóricamente la posición estratigráfica de los complejos litológicos de esta unidad. La cuestión más difícil, y en ocasiones imposible de establecer, es la presencia de los estratos que ocupan la posición más baja en el perfil, pero la mayoría de los autores considera que las capas más inferiores son las más arcillosas y ricas en restos vegetales.

2. Formación Artemisa,

Subdivisiones: Miembros La Zarza y Sumidero:

- **Miembro La Zarza,**

Unidad principal: Formación Artemisa.

Litología diagnóstica: Calizas micríticas con finas intercalaciones de esquistos arcillosos. En la parte superior se desarrollan calizas micríticas y calcilutitas con intercalaciones de calizas bioclásticas y coquinas constituidas por conchas de Ammonites y Aptychus.

Edad: Jurásico Superior (Oxfordiano Medio parte alta)- Cretácico Inferior (Berriasiano parte baja).



Ambiente de sedimentación: Se depositó en una zona cercana al talud, en aguas marinas someras y medianamente profundas.

Espesor: Oscila entre 80 y 200 m.

Observaciones: Se desarrolla en la parte baja de la Formación Artemisa.

- **Miembro Sumidero,**

Litología diagnóstica: Caliza micrítica con finas intercalaciones de pedernal. El color de la caliza es variable predominando los tonos grises. Las calizas en general se encuentran finamente estratificadas.

Edad: Cretácico Inferior (Berriasiano- Valanginiano).

Ambiente de sedimentación: Se depositó en un ambiente de mar profundo.

Espesor: Oscila entre 50 y 200 m.

Observaciones: Ocupa la parte alta de la Formación Artemisa.

Continuación Formación Artemisa:

Litología diagnóstica: Calizas micríticas bien estratificadas en capas finas a medianas, calcilutitas, calcarenitas e intercalaciones de silicitas con radiolarios. En la base aparecen esporádicamente limolitas y areniscas de grano fino.

Edad: Jurásico Superior (Oxfordiano Medio parte media) - Cretácico Inferior (Valanginiano).

Ambiente de sedimentación: Su parte inferior se depositó probablemente en la zona de transición a la batial, predominando la sedimentación carbonática de aguas neríticas. Su parte superior se depositó en un ambiente más profundo, pelágico.

Espesor: Oscila entre 700 y 800 m.

Observaciones: La edad de la parte baja de esta unidad no ha sido datada con precisión, pudiendo llegar, en opinión de algunos investigadores, hasta la parte más alta del Oxfordiano Medio.

3. Formación Jagua,

Litología diagnóstica: Calizas micríticas, esquistos arcilloso- margosos, lutitas calcáreas.

Edad: Jurásico Superior (Oxfordiano Medio- Superior).

Ambiente de sedimentación: Se depositó en un ambiente nerítico poco profundo dentro de la plataforma.

Espesor: Puede llegar hasta los 160 m

4. Formación Francisco,

Litología diagnóstica: Argilitas, limolitas, calizas micríticas, esquistos e intercalaciones de areniscas. En ocasiones se observan concreciones calcáreas dentro de los esquistos



con restos fósiles. Predominan los esquistos y las calizas, estas últimas están frecuentemente laminadas.

Edad: Jurásico Superior (Oxfordiano Medio parte alta- Oxfordiano Superior parte baja).

Ambiente de sedimentación: Se depositó probablemente en un ambiente de plataforma marina.

Espesor: Oscila entre 1 y 25 m.

5. Grupo Mariel,

Litología diagnóstica: Calizas organogenas y arenosas, areniscas polimícticas, limolitas, argilitas, arcillas, gravelitas polimícticas, conglomerados polimícticos, calcilutitas, grauvacas calcáreas y calcarenitas.

Edad: Paleoceno- Eoceno Inferior parte baja.

Ambiente de sedimentación: Se depositó en un ambiente marino fluctuante, de cuenca abierta, con sedimentación de tipo flysch.

Espesor: Oscila entre 35 y 600 m.

Observaciones: G. Furrázola- Bermúdez *et al.* (1978) reúne en el Gr. Madruga las Formaciones Mercedes, Apolo, Alkazar (en orden cronológico), todas paleocénicas, con una litología y origen muy similar.

6. Grupo Universidad,

Litología diagnóstica: Margas, calizas arcillosas, argilitas silíceas, nódulos de pedernales, calizas arcillosas silicificadas, calizas organógenas y en algunos de sus cortes presentan conglomerados basales de fragmentos pequeños de matriz areno-arcillosa polimíctica.

Edad: Eoceno Inferior parte alta - Eoceno Medio parte baja.

Ambiente de sedimentación: Se depositó en un ambiente batial.

Espesor: 50 m, en ocasiones mayor.

7. Formación Manacas,

Litología diagnóstica: Areniscas polimícticas, limolitas, argilitas, calcarenitas, pedernales, calizas, depósitos caóticos policomponentes de matriz aleurolítica, polimíctica con intercalaciones de areniscas vulcanomícticas y pedernales.

Edad: Eoceno Inferior- Medio parte baja.

Ambiente de sedimentación: Depósitos terrígenos sinorogénicos formados por corrientes turbidíticas en el talud continental, asociados al sobrecorrimento de los



complejos del arco volcánico Cretácico y las ofiolitas sobre los depósitos de la cordillera de Guaniguanico.

Espesor: Alrededor de 200 m.

8. Formación Loma Candela,

Litología diagnóstica: Arcillas calcáreas, calizas arcillosas, margas, areniscas calcáreas, gravelitas y conglomerados.

Edad: Eoceno Medio parte alta.

Ambiente de sedimentación: Se depositó en un ambiente nerítico.

Espesor: 250-300 m.

9. Formación Paso Real,

Litología diagnóstica: Son característicos en ella los cambios litológicos abruptos tanto vertical como lateralmente. Predominan las alternancias de calizas y margas. Las calizas son arcillosas, biodetríticas arcillosas y más subordinadamente calizas biohémicas, calizas dolomitizadas, dolomitas y calcarenitas. Las calizas arcillosas por desagregación originan pseudoconglomerados calcáreos de matriz margoso- arenácea. En general son masivas. Las margas, al igual que las calizas son fosilíferas. Aparecen intercalaciones de areniscas y limolitas calcáreas y arcillas (principalmente esmectita) que contienen en algunos horizontes piritita, yeso, halita y lignito. En el área tipo se observa en la base un conglomerado polimíctico de matriz margosa, fosilífera. La estratificación está enmarcada por los cambios litológicos y es frecuentemente en forma de lentes. Colores crema, blancuzco y grisáceo en los horizontes carbonáticos y grisáceo y verdoso en los terrígenos.

Edad: Oligoceno Superior- Mioceno Superior basal.

Ambiente de sedimentación: Se depositó en un ambiente sublitoral limitado y en áreas lagunares de circulación restringida, señaladas éstas por la asociación *Ammonia* - Ostrácodos y la presencia de yeso, halita, piritita y lignito en sedimentos arcillosos.

Espesor: Oscila entre 30 y 1 640 m (este último en el pozo Candelaria 1 e incluye al Mb. Baños).

2.8 Magmatismo

En la zona no hay manifestaciones de rocas magmáticas. Excepto los cuerpos fríos ofiolíticos paralelos a la Falla Pinar.



2.9 Tectónica

A partir del artículo “Estratigrafía y tectónica de la Sierra del Rosario...” publicado en la revista Minería y Geología en el año 2000 por los autores Jorge L. Cobiella Reguera, Santa Gil González, Arturo Hernández Escobar y Niurka Díaz Díaz, se realizó la siguiente síntesis:

La sierra de Rosario posee una tectónica compleja, cuyos rasgos característicos son los nappes, señalados por Pszczolkowski en varias ocasiones.

Los nappes son su elemento estructural más conspicuo. En su más reciente trabajo, (Pszczolkowski, 1982) consideró la existencia de dos grandes grupos o paquetes de nappes: meridionales, septentrionales con cortes estratigráficos diferentes en ciertos niveles y similares en otros, lo cual evidencia que las rocas que los constituyeron se acumularon no muy lejos entre sí.

En los mantos tectónicos hay gran cantidad de deformaciones, tanto plicativas, como disyuntivas. Las características de las deformaciones están en función de la litología, posición en el nappe y posiblemente, la profundidad a la cual ocurrió la deformación. En las Formaciones con estratificación más gruesa no se observan pliegues o estos son mucho mayores y menos evidentes que en las bien estratificadas.

Un elemento esencial en la tectónica de la Sierra es la omnipresencia de fallas desde niveles milimétricos hasta sobrecorrimientos que pueden por el rumbo seguirse decenas de kilómetros. En las secuencias finamente estratificadas cada plano de estratificación, especialmente según las argilitas, constituye una superficie de deslizamiento. En todo su volumen estas Formaciones se han deslizado capa a capa, a la manera del flujo laminar en un material muy viscoso. Muchos de las fallas siguen, al menos en parte, los planos de estratificación. El paralelismo general entre el rumbo de las capas y el trazo de los planos de sobrecorrimiento respalda esta aseveración en las cercanías de los planos de sobrecorrimiento se disponen brechas tectónicas, zonas de rocas foliadas y lente tectónicas.

Un punto de trascendental importancia en la tectónica de la Sierra son los melanges. Este tema fue tratado por (Cobiella-Reguera, 1998), por eso nos limitemos a una breve síntesis del citado artículo. Como tal melange se considerarán los macizos rocosos cartografiados a escala 1:25 000 a 1:50 000 o menores caracterizados por una estructura interna caótica, originada por la molienda, escamadura y mezcla con su entorno, excepto aquellos más jóvenes que pueden descansar estratigráficamente sobre el melange. Es interesante anotar que a nivel regional, se observan ciertas regularidades en la abundancia y composición de los melanges. Estructuras semejantes a los melanges beta no han sido reportados en el resto de la cordillera, ni los autores las han detectados en



sus recorridos. Esto puede tener su origen en el papel muy subordinado de las rocas arcillosas en los cortes mayormente carbonatados del Jurásico Superior y Cretácico en la Sierra de los Órganos. Por otra parte, las rocas de la Formación Manacas están casi totalmente ausentes en las Alturas de Pizarras del Sur y en la porción SW de las alturas de Pizarras del Norte y solo son abundantes en la mitad norte de las últimas elevaciones, que contienen la prolongación de los nappes más bajos de la Sierra del Rosario.

2.10 . Hidrogeología

La principal corriente superficial de la región y del área de los trabajos es el Río San Diego también conocido como “*caiguanabo*” en un tramo de su recorrido corre desde W a E y se caracterizan por ser estrecho y de cauce profundo, en algunos tramos forma meandros.

El área de estudio es muy heterogénea. Existe un gran número de manantiales que presentan aguas con muy diferentes calidades. Las investigaciones realizadas por (Fagundo y colaboradores desde 1984), sobre la denudación química del karst tropical y el control de la composición química de las aguas así como los estudios efectuados por (Peláez et al.1990) relacionados con la prospección de aguas minerales y mineromedicinales, han suministrado una abundante información que permite establecer el control geológico sobre los recursos de aguas subterráneas en la región. De estos estudios se infiere que los múltiples manantiales de diferente naturaleza hidrogeológica que ocurren en la región se deben a la naturaleza cárstica del terreno, a la disposición de las secuencias estratigráficas presentes y a los procesos de interacción agua-roca correspondientes.

La principal corriente fluvial es el Río San Diego. Su lámina de escurrimiento fluvial, es de las mayores del país. Mientras que la disección horizontal es también una de las más notables, con valores de 400 -500 m.

Justo en las márgenes del río San Diego o Caiguanabo, divisoria natural entre las sierras de Los Órganos y el Rosario, se encuentran los manantiales de San Diego de los Baños, cercanos al poblado de igual nombre. La explotación de los mismos se realiza como parte del servicio asistencial del balneario homónimo, que toma su nombre precisamente de los mismos (J.R. Fagundo Castillo, J. Carrillo Rivera, I. Antigüedad, , P. González R.Hernández, C. Melián Rodríguez, M. Suárez Muñoz J. Pajón Morejón, R. Peláez García, 2004).

Debido a la prevalencia del relieve cárstico en la región, la infiltración de las precipitaciones a través de los macizos es instantánea y de carácter gravitatorio. Las



Comportamiento hidrológico de los flujos que drenan la cuenca de San Diego-Bermejales
Bruno Eddy Lima MADRE DEUS

zonas hidrogeológicas en los macizos cársticos han sido definidas por la relativa posición del nivel piezométrico y el movimiento del agua en la zona vadosa. Una zona transicional definida por la posición relativa de las aguas de lluvia que discurren por el suelo hasta alcanzar el nivel piezométrico, consiste en cueva que almacenan aguas periódicamente. Estas cuevas alcanzan una profundidad de hasta 100 m y menos. Algunas de estas cavernas se encuentran a menudo inundadas y se observan surgencias laterales a través de manantiales con caudales de varios litros por segundo, cuyas aguas no son capaces de seguir su recorrido subterráneo hacia abajo hasta contactar con sedimentos impermeables. Las cuevas constituyen conductos subterráneos originados por disolución química y la posición del nivel piezométrico ha sido establecida por observaciones de campo y perforaciones de pozos. Investigaciones espeleológicas recientes han confirmado la existencia de extensos sistemas cavernarios en la zona de transición (. Molerio L. F, 2006)

Las aguas de estas surgencias cársticas son de carácter sulfatado cálcico sulfuroso, con una mineralización total de 2,0 a 2,2 g/litros, con un notable caudal de hasta 15 l/seg. La región no se caracteriza por tener grandes lagos, pero muchos de sus ríos han sido represados y constituyen importantes embalses artificiales, como la Presa Juventud.



Capítulo III: Materiales y métodos

3.1. Introducción

Para llevar a cabo esta investigación se hizo primeramente un estudio de la bibliografía existente relacionada con el tema.

Una vez establecidas las rasgos esenciales de la región estudiada, se pasó a la realización de los trabajos de campo. En esta fase se aplicaron las diversas técnicas de investigaciones hidrogeológicas, hidrológicas y geológicas disponibles para llevar a cabo de la forma más completa, efectiva y eficiente posible el trabajo, dentro de las posibilidades presupuestarias del mismo. Su objeto final será corroborar la hipótesis inicial de la investigación anteriormente planteada.

Metodología de Investigación

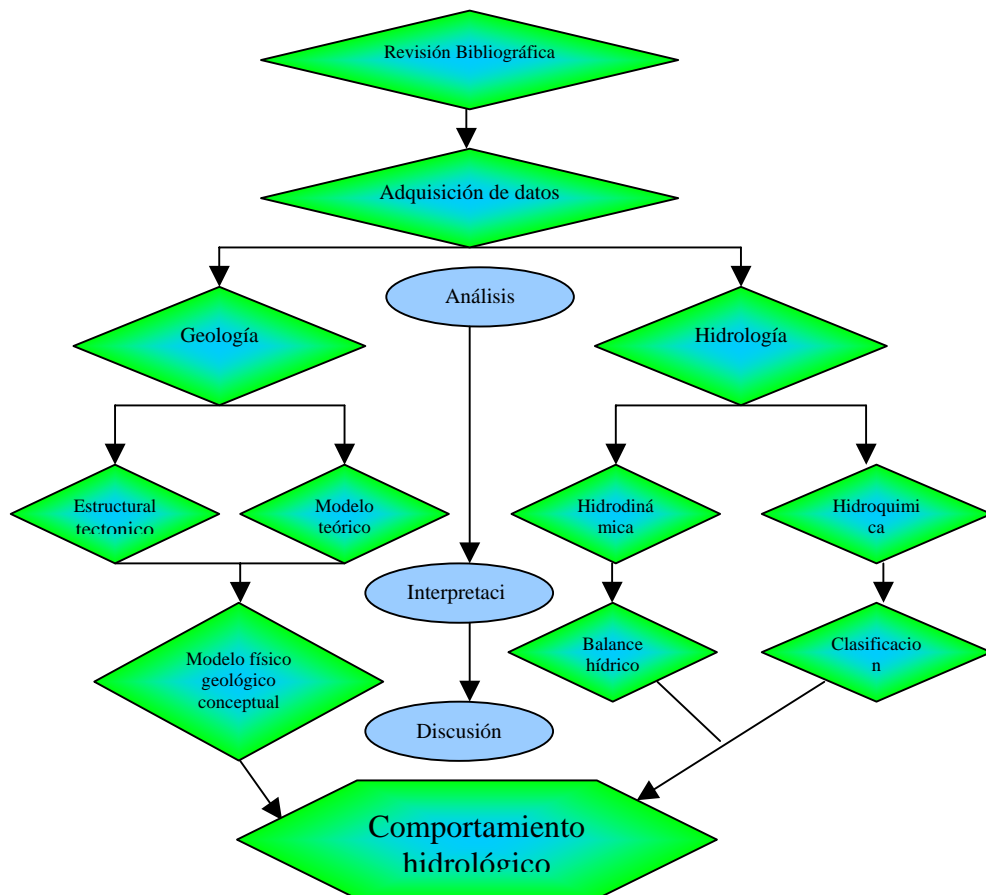


Figura 6. Metodología de los trabajos realizados

3.2. Materiales

Para el desarrollo de este trabajo se utilizaron datos: pluviométricos, conductividad eléctrica, el caudal entre otros. Las mediciones del pH, Eh, oxígeno disuelto y temperatura se realizaron en el campo.

Se trataron los datos estadísticamente por medio de software y métodos estadísticos matemáticos con el objetivo de analizar la consistencia de los datos y hallar la tendencia de futuros comportamientos en las mismas condiciones, por medio de (Statistica 6.0, Excel etc.).

Para el estudio del balance hídrico se utilizaron datos de precipitación, temperatura, evapotranspiración y caudal de las cuatro subcuencas objetos de estudio dentro de la Estación “La Amistad” en Bermejales.

El período de análisis diario comprende los meses Octubre – Diciembre (2004) que corresponde a 92 días, y el período de análisis mensual comprende los años 2001-2006 que equivale a 69 meses. Finalmente se estimó estadísticamente el comportamiento anual de dichas subcuencas, basado en un análisis a nivel mensual.

En las representaciones gráficas, de los hidrogramas y mapas que se presentan en el capítulo siguiente se muestran el comportamiento temporal de las variables estudiadas y se realiza un análisis de los datos para su interpretación.

Se emplearon los softwares SURFER 8, GRAPHER 5 y el Autocad Map Overlay 2006 que se usó principalmente en la digitalización de la red hidrográfica, delimitación de las cuencas, digitalización de los órdenes de los ríos etc.

Fueron utilizados diferentes mapas (geológico y topográfico), para hacer la caracterización hidrodinámica e hidroquímica de acuerdo a la litología presente en cada punto de monitoreo y trazar la red hidrográfica.



3.3. Métodos

3.3.1. Métodos geológicos

Partimos de revisión de los trabajos geológicos y se realizó el levantamiento geológico, la toma de muestras y mediciones que tuvieron lugar en el campo. Durante el análisis hidrogeológico se consideró principalmente la presencia de acuíferos en explotación, pero también se tuvieron en cuenta las manifestaciones naturales (manantiales).

3.3.2. Métodos Matemáticos y estadísticos

Primeramente se analizó la consistencia de los datos y se determinó también la tendencia de los datos de cada variable y sus correlaciones.

Se calculó la estadística elemental, en la determinación de la media, la varianza y la desviación estándar. Con los datos de desviación estándar y la media, fue posible

sustituirlos en la ecuación $N = \left(\frac{1,95x\delta^2}{0,05} \right) \frac{1}{x}$ para la estimación del número de meses

necesarios para que los datos sean representativos. (García Sánchez, E, Andreu Rodes, J.M, Pulido Bosch, A, Jordán Vidal, M.M, Ayanz López-Cuervo, J.J. 2001)

Se determinó la relación de las precipitaciones con el caudal a la escala de días, y esto permitió determinar la relación de las precipitaciones y el caudal a la escala de años. Observando un error mínimo a gran escala.

Con las ecuaciones obtenidas de estas relaciones, se pasó al completado de las series de caudal a nivel mensual para el periodo 2001-2006, para cada una de las subcuencas objeto de estudio. Y así poder presentar el balance hídrico a nivel anual para los años 2001 al 2006, y a nivel diario para los meses de Octubre, Noviembre y Diciembre del año 2004.

A partir de estos datos fue posible estimar el balance hídrico ideal para cualquier año, partiendo de los valores promedios de cada mes.



3.3.3 Modelo físico y geológico Conceptuales

Para establecer el modelo geológico se partió, de las informaciones tomadas de otras investigaciones, y a partir del reconocimiento geológico realizado por el autor de la presente investigación.

Se elaboro un modelo preliminar físico-geológico del área de estudio.

En la presente tesis se confeccionaron los siguientes anexos gráficos:

- **Cortes estratigráficos:** efectuados en dos direcciones principales donde se enmarcan la edad de las rocas, su litología, posición y espesor de los acuíferos, discordancias, niveles freáticos, etc. Con el fin de poder estimar los espesores de las Formaciones y la extensión de las estructuras en profundidad. Los perfiles figuras 17 y 18 se anexan.

Mapas tectónicos y estructurales*: La identificación y disposición de los elementos tectónicos regionales, y los acuíferos presentes en la zona de estudio fue posible por el análisis de la de la geología estructural este estudio partió desde la escala regional hasta la local.

A escala regional la tectónica y las estructuras están condicionadas por su propia génesis: los eventos sedimentarios, la paleogeografía y los diferentes procesos de fracturas ayudaron, caracterizar el comportamiento hidrogeológico de la zona. Las estructuras que son perpendiculares a la dirección del esfuerzo de compresión mínima, en general son indicios de fallas, tienden a estar abiertas, formando canales preferenciales para los flujos. (Anexo fig. 20)

Estas estructuras son identificadas en la escala regional, o sea a través del mapeo geológico y un detallado estudio de los planos de fracturas (para el estudio del movimiento de las estructuras).

- **Mapas litólogo-faciales:** Distribución de las Formaciones, las estructuras, los depósitos, sus espesores, variaciones y fundamentalmente sus contactos.

3.3.4 Métodos hidrológicos

Para la caracterización hidrológica se partió del mapa de orden de los ríos en la cuenca Bermejales-San Diego, así como sus formas, análisis del drenaje, pendientes, longitudes,



establecimiento del río principal, descripción del proceso de escorrentía: volumen de escurrimiento, lámina de escurrimiento.

Se estimaron los valores de evapotranspiraciones potenciales mediante la formula de Thornthwaite. Se cálculo las precipitaciones y finalmente se estableció el balance hídrico superficial de las subcuenca que drenan al río San Diego.

3.3.4.1 Muestreo Superficial de aguas

El monitoreo fue realizado a las aguas de lluvia, las de escorrentía superficial (afluentes, arroyos, ríos y manantiales). Todo con el objetivo de caracterizar y clasificar las aguas que drenan la región.

3.3.4.2 Hidroquímica de las aguas

Sobre la base cartográfica de la región de estudio se ubicó la información de: La conductividad, pH, Eh, oxígeno disuelto de las aguas, y los resultados de los macrocomponentes de las muestras de agua superficial y subterránea. Todo con el fin de analizar el comportamiento espacial de estas variables en la cuenca. **Anexo** (figuras 31, 32 y 33; tabla 11). Todo este análisis es el resultado de un monitoreo continuo de las aguas del macizo Bermejales-San Diego.

Es de destacar las pequeñas variaciones de las conductividades de las aguas de los manantiales por formar estas un mismo tipo de agua.

3.3.4.3 Hidrodinámica superficial: Dirección del movimiento de las aguas superficiales. Zonas de recarga y descarga:

Para la determinación preliminar de las zonas de recargas y descarga del tramo Bermejales-San Diego, fue necesario hacer un estudio integrado de la geología, geomorfología, pluviometría y finalmente se analizaron los caudales de los manantiales. Los manantiales que tenían mayores intensidades de caudal de aporte a la cuenca del río San Diego correspondieron a las zonas de recargas subterráneas del río y zonas con mayores elevaciones correspondientes a mayores precipitaciones, determinan zonas de recargas. El río San Diego descarga en el mar Caribe, esta constituye la zona de su principal descarga (anexo figura 33).

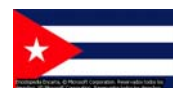
Se identificó el comportamiento hidrogeológico del sistema acuífero carbonatado drenado por el Río San Diego (macizo de Sierra de Rosario), a partir de la interpretación de los hidrogramas recogidos y su comparación con los aportes pluviométricos. Se explicó las diferentes curvas de crecida-decrecidas observadas, en función del grado de organización



del drenaje en el sistema. De esta forma, se pone de manifiesto el comportamiento del acuífero, debido al efecto modulador que sobre la infiltración ejerce, sobre todo, la zona no saturada, consecuencia de lo cual es la homogeneización de las respuestas a nivel de la surgencia, que dependen, fundamentalmente, del estado hidrodinámico del acuífero, es decir de los episodios anteriores (esto se ve en los hidrogramas que se presentan en el capítulo siguiente).

3.3.4.4 Establecimiento de las relaciones acuíferos-río a partir de los hidrogramas:

Una vez que existe conexión hidráulica entre el acuífero y la corriente superficial en la mayor parte de las ocasiones, se suelen dar condiciones de efluencia o lo contrario: influencia con respecto a los acuíferos. A partir de los hidrogramas presentaremos tal conclusión.



Capítulo IV: Análisis de consistencia de datos estadísticos

4.1 Análisis de consistencia de datos:

Los datos pluviométricos, y de caudales a nivel mensual, se procesaron con el fin de determinar su confiabilidad y consistencias, la que comprende la elaboración de tablas con valores promedios a nivel mensual y trimestral. La construcción de tablas estadísticas y de curvas de regresión, con el fin de identificar, cuantificar saltos en las series analizadas.

Para el estudio se utilizó el método de regresión, empleándose el siguiente procedimiento:

- Se seleccionó el período común de tres meses (Octubre, Noviembre y Diciembre) de información del grupo de estaciones utilizadas en el estudio. Este periodo corresponde al periodo que se posee los datos de precipitación y caudales a niveles diarios, o sea a una escala más detallada. Lo que implicaría que una vez analizada la consistencia de los datos y halladas las ecuaciones de tendencias y correlaciones entre las variables, se podrá estimar perfectamente una de estas variables a niveles mensuales, a una escala de menor detalle, como en nuestro caso los meses que corresponden al período 2001-2006.
- Se determinó la precipitación mensual para cada subcuenca; para los datos faltantes a nivel mensual, se procedió a reemplazarlos temporalmente por los promedios mensuales de la serie.
- Los valores mensuales son acumulados en orden cronológico, a partir del mes más antiguo (Octubre) hasta el más reciente (Diciembre).
- Se graficó cada uno de los valores de las precipitaciones acumuladas y caudal de cada estación con el promedio acumulado de ellas, para determinar el patrón en cada grupo.

Subcuenca 1

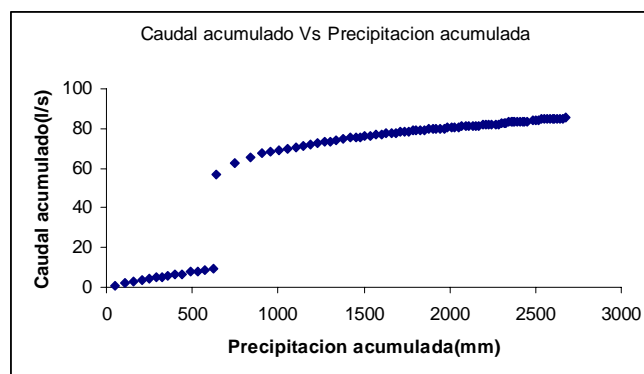


Figura 7: Grafico de precipitacion Vs Caudal, Subcuenca 1

Subcuenca 2

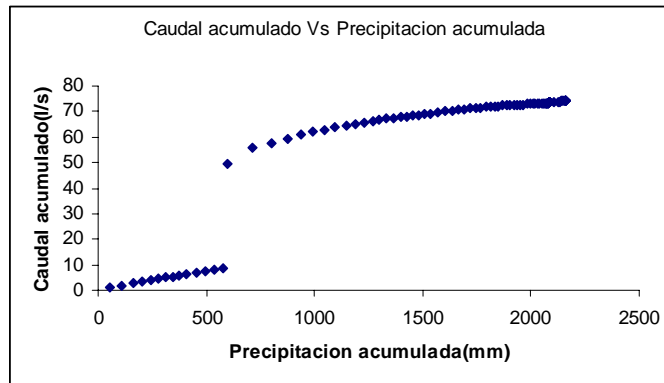


Figura 8: Gráfico de precipitación Vs Caudal, Subcuenca 2

Subcuenca 3

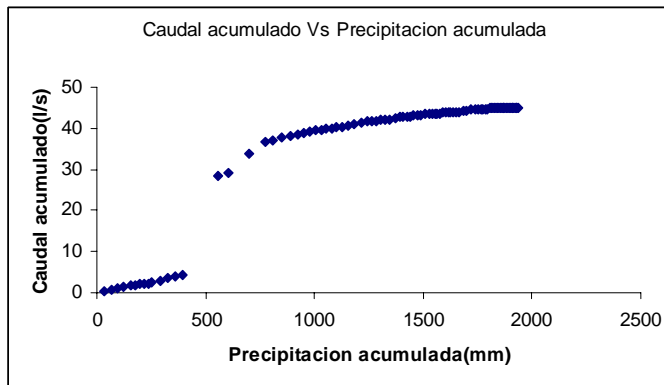


Figura 9: Gráfico de precipitación Vs Caudal, Subcuenca 3

Subcuenca 4

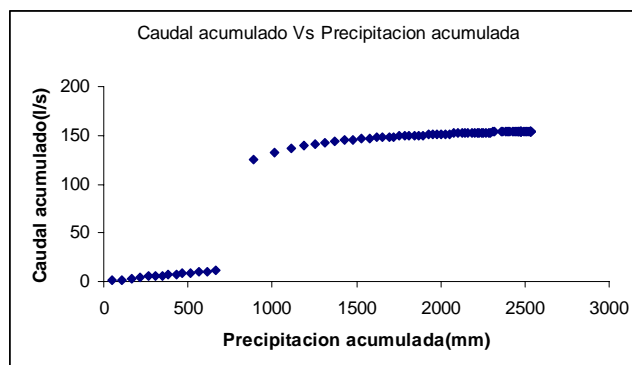


Figura 10: Gráfico de precipitación Vs Caudal, Subcuenca 4

- Si los puntos ploteados presentaran una sola tendencia, es decir si se pudiera trazar por ellos una recta sin quiebres, significaría que la estadística ha sido consistente.

Comportamiento hidrológico de los flujos que drenan la cuenca de San Diego-Bermejales
Bruno Eddy Lima MADRE DEUS

- pero los puntos presentan quiebres y cierta dispersión, eso implica que la estadística no es consistente y se procedió a su corrección a partir de la eliminación y llenado del espacio eliminado por un valor promedio de la serie.
- Se obtuvo los siguientes resultados, no necesariamente presentan una tendencia perfecta puesto que la naturaleza no es ideal, pero se consiguió que se aumentaran la confiabilidad de los datos a un gran por ciento.

Subcuenca 1

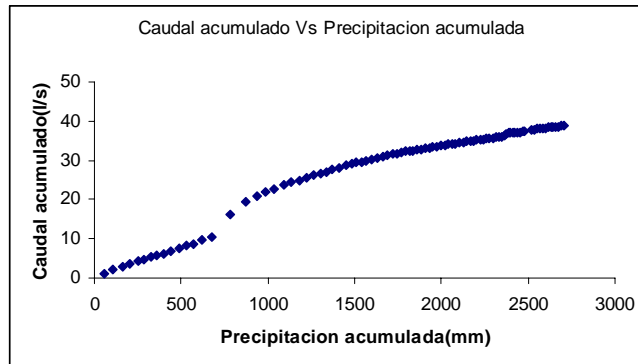


Figura 11: Grafico de precipitacion Vs Caudal, Subcuenca 1

Subcuenca 2

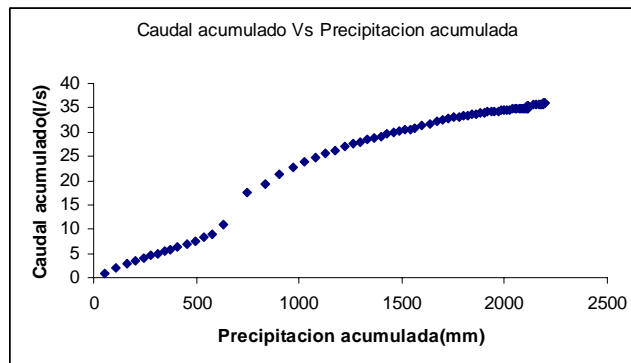


Figura 12: Grafico de precipitacion Vs Caudal, Subcuenca 2

Subcuenca 3

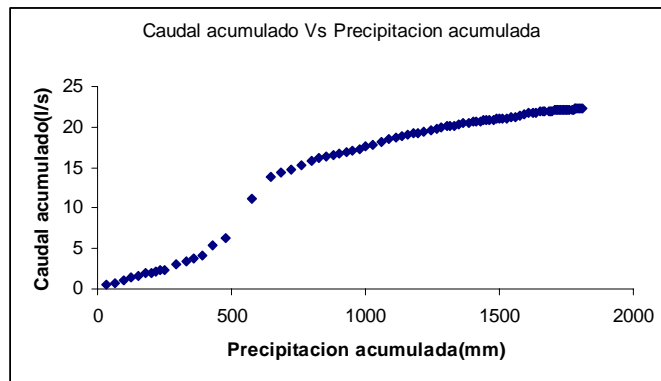


Figura 13: Grafico de precipitacion Vs Caudal, Subcuenca 3

Subcuenca 4

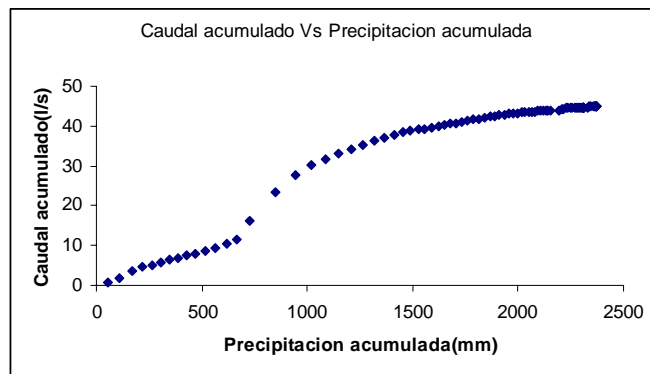


Figura 14: Grafico de precipitacion Vs Caudal, Subcuenca 4

Una vez determinada la consistencia de los datos se calculó la relación que tienen los datos de precipitación Vs. Caudal, haciendo primeramente otro análisis de las variables de cada subcuenca a nivel de la cuenca principal San Diego a partir del estudio estadístico que sigue.

4.2 Análisis estadístico

Se ha medido la Precipitación y estimados los valores de caudal, volumen y el déficit de escorrentía superficial de 4 subcuencas correspondiente a un periodo de 3 meses, los valores se han distribuido en días y aparecen en la tabla anexa 10.

Sea cual sea la distribución, para caracterizar los caudales del Río San Diego fue necesario disponer de un valor indicativo de su tendencia central (media) y otro valor que nos indique la dispersión: si los valores están apretados o alejados a ambos lados de la media. La dispersión de los datos a ambos lados de la media se evaluó mediante la

Comportamiento hidrológico de los flujos que drenan la cuenca de San Diego-Bermejales
Bruno Eddy Lima MADRE DEUS

desviación típica (o estándar, es lo mismo). La desviación típica (s) se calcula en función de la suma de las desviaciones de cada punto a la media previamente calculada (x). n es el número total de datos.

El cuadrado de la desviación típica es la varianza. (tablas1, 2, 3 y4) para los meses de Octubre, Noviembre y diciembre)

Tabla 1: Análisis estadístico elemental de la subcuenca 1, para los meses de Octubre, Noviembre y Diciembre.

	Periodo	Parámetros	media	Desviación estándar	Varianza
Subcuenca 1	Octubre	Precipitación (mm)	47,80	15,46	239,05
		Caudal (l/s)	0,99	1,03	1,07
		Déficit escorrentía(mm)	28,30	15,46	239,05
		Volumen (l)	82088,11	85172,85	7254415105,86
	Noviembre	Precipitación (mm)	24,08	4,10	16,80
		Caudal (l/s)	0,20	0,08	0,01
		Déficit escorrentía(mm)	7,16	4,10	16,80
		Volumen (l)	17433,47	6596,83	43518167,71
	Diciembre	Precipitación (mm)	16,26	4,29	18,39
		Caudal (l/s)	0,12	0,12	0,01
		Déficit escorrentía(mm)	1,37	4,29	18,39
		Volumen (l)	7919,37	5725,50	32781380,07
	Subcuenca 1	Precipitación (mm)	29,38	7,95	91,41
		Caudal (l/s)	0,43	0,41	0,36
		Déficit escorrentía(mm)	12,27	7,95	91,41
		Volumen (l)	35813,65	32498,40	2443571551,21

Tabla 2: Análisis estadístico elemental de la subcuenca 2, para los meses de Octubre, Noviembre y Diciembre.

			media	Desviación estándar	Varianza
Subcuenca 2	Octubre	Precipitación (mm)	47,05	18,17	330,15
		Caudal (l/s)	0,96	1,13	1,28
		Déficit escorrentía(mm)	27,55	18,17	330,15
		Volumen (l)	86738,73	98992,50	9799514908,53
	Noviembre	Precipitación (mm)	20,75	7,55	57,05
		Caudal (l/s)	0,17	0,12	0,02
		Déficit escorrentía(mm)	3,83	7,55	57,05
		Volumen (l)	13146,91	10016,50	100330189,24
	Diciembre	Precipitación (mm)	3,61	5,48	30,08
		Caudal (l/s)	0,03	0,08	0,01
		Déficit escorrentía(mm)	-11,28	5,48	30,08
		Volumen (l)	2083,36	5881,36	34590374,03
	Subcuenca 1	Precipitación (mm)	23,80	10,40	139,09



Comportamiento hidrológico de los flujos que drenan la cuenca de San Diego-Bermejales
Bruno Eddy Lima MADRE DEUS

	<i>Caudal (l/s)</i>	0,39	0,45	0,43
	<i>Déficit escurrentía(mm)</i>	6,70	10,40	139,09
	<i>Volumen (l)</i>	33989,67	38296,78	3311478490,60

Tabla 3: Análisis estadístico elemental de la subcuenca 3, para los meses de Octubre, Noviembre y Diciembre

			media	Desviación estándar	Varianza
Subcuenca 3	Octubre	<i>Precipitación (mm)</i>	33,17	16,06	258,07
		<i>Caudal (l/s)</i>	0,57	0,91	0,83
		<i>Déficit escurrentía(mm)</i>	13,90	16,06	258,07
		<i>Volumen (l)</i>	32414,84	29562,12	873918926,70
	Noviembre	<i>Precipitación (mm)</i>	17,66	5,50	30,26
		<i>Caudal (l/s)</i>	0,12	0,08	0,01
		<i>Déficit escurrentía(mm)</i>	0,74	5,50	30,26
		<i>Volumen (l)</i>	9994,32	7191,04	51711077,85
	Diciembre	<i>Precipitación (mm)</i>	8,18	4,16	17,29
		<i>Caudal (l/s)</i>	0,03	0,05	0,00
		<i>Déficit escurrentía(mm)</i>	-6,72	4,16	17,29
		<i>Volumen (l)</i>	2517,10	2505,71	6278559,63
	Subcuenca 1	<i>Precipitación (mm)</i>	19,67	8,57	101,87
		<i>Caudal (l/s)</i>	0,24	0,35	0,28
		<i>Déficit escurrentía(mm)</i>	2,64	8,57	101,87
		<i>Volumen (l)</i>	14975,42	13086,29	310636188,06

Tabla 4: Análisis estadístico elemental de la subcuenca 4, para los meses de Octubre, Noviembre y Diciembre

			media	Desviación estándar	Varianza
Subcuenca 4	Octubre	<i>Precipitación (mm)</i>	52,27	18,78	352,82
		<i>Caudal (l/s)</i>	1,29	1,52	2,30
		<i>Déficit escurrentía(mm)</i>	32,77	18,78	352,82
		<i>Volumen (l)</i>	99398,55	111736,97	12485150399,94
	Noviembre	<i>Precipitación (mm)</i>	20,29	7,11	50,61
		<i>Caudal (l/s)</i>	0,15	0,09	0,01
		<i>Déficit escurrentía(mm)</i>	3,36	7,11	50,61
		<i>Volumen (l)</i>	11844,95	7703,31	59340963,18
	Diciembre	<i>Precipitación (mm)</i>	4,63	4,51	20,37
		<i>Caudal (l/s)</i>	0,02	0,02	0,00
		<i>Déficit escurrentía(mm)</i>	-10,27	4,51	20,37
		<i>Volumen (l)</i>	1085,44	1314,11	1726894,41
	Subcuenca 4	<i>Precipitación (mm)</i>	25,73	10,14	141,27
		<i>Caudal (l/s)</i>	0,48	0,54	0,77
		<i>Déficit escurrentía(mm)</i>	8,62	10,14	141,27
		<i>Volumen (l)</i>	37442,98	40251,46	4182072752,51

Una vez determinado los promedios de cada variable en cada subcuenca se estimaron el comportamiento de cada variable a nivel diario (Octubre, Noviembre y Diciembre) para la cuenca del Río San Diego donde se encuentran. Pasando después a la determinación de la ecuación de la relación de la precipitación vs. Caudal:

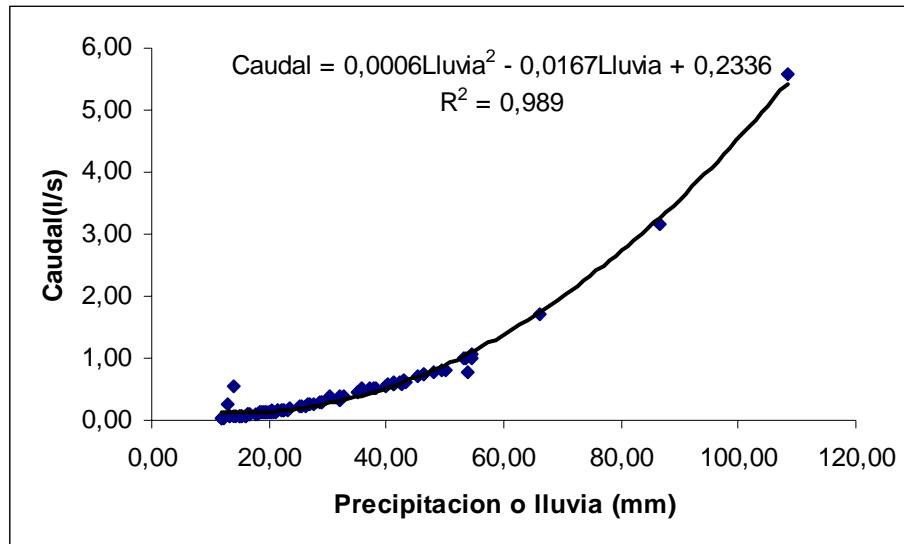


Figura 15: Grafico de la relación Precipitación Vs. Caudal

Para la estimación del número de muestras (meses) o longitud de la serie representativas para los casos de los datos mensuales en los años 2001-2006 y el caso de los datos estimados para el balance ideal anual se usó la formula (García Sánchez, E, Andreu Rodes, J.M, Pulido Bosch, A, Jordán Vidal, M.M, Ayanz López-Cuervo, J.J. 2001)

$$N = \left(\frac{1,95 \times \delta^2}{0,05} \right) \frac{1}{\bar{x}^2}$$

Donde:

δ - Desviación estándar

\bar{x} - Media

N - Número de muestras (meses o días, dependiendo del caso)

Caso de los datos anuales 2001-2006:

$$N = \left(\frac{1,95 \times 18742,25}{0,05} \right) \frac{1}{26669,38} \times 100\%$$

Comportamiento hidrológico de los flujos que drenan la cuenca de San Diego-Bermejales
Bruno Eddy Lima MADRE DEUS

Para una probabilidad de 100% la longitud de la serie debe ser 27,4 meses y la cantidad de muestras utilizada ha sido de 69 meses. Así que tenemos que para este caso esta probada la confiabilidad de los datos.

Caso del balance hídrico ideal anual:

$$N = \left(\frac{1,95 \times 18742,25}{0,05} \right) \frac{1}{26669,38} \times 100\%$$

Para una probabilidad de 100% la longitud de la serie debe ser 17,78 meses, pero como se tomo como un año ideal que contiene apenas 12 meses, lo que implica que para este caso los datos serían confiables con un 67,5% de certeza. Pero que también no deja de comprobar la confiabilidad de los datos puesto que 67,5% todavía está próximo al margen aceptable de error que es 70%.



Capítulo V: Análisis y discusión de los resultados

5.1. Análisis geológico de la región

La región de San Diego de los Baños fundamentalmente se desarrolla en rocas calcáreas de la Formación Artemisa con potencialidades acuíferas, representado por calizas micríticas bien estratificadas, calcilutitas, calcarenitas y algunas calciruditas. Se incluyen esporádicas intercalaciones finas de silicitas con radiolarios y argilitas margosas. En la base, con poca frecuencia, aparecen aleurolitas y areniscas de grano fino. El espesor de esta formación puede llegar hasta 700m aproximadamente. El ángulo de buzamiento varía entre 45° y 65°, con dirección del buzamiento S-SE (Anexo: figura 16). Por el contorno en la región se desarrolla otras Formaciones geológicas tales como Los Negros, Manacas, Mariel, San Cayetano y otras.

5.2. Cortes estratigráficos

Los perfiles se realizaron en dos direcciones principales, (Anexo: figuras 17y 18) donde se enmarcan las edades de las rocas, su litología, posición y espesor de las estructuras geológicas, discordancias, etc. Con el fin de poder estimar los espesores de las Formaciones y la extensión de las estructuras en profundidad. Se puede interpretar a partir de estos perfiles que la región se encuentra dividida en dos bloques separados por la Falla Pinar, enmarcando una discordancia estructural reflejada por la inversión de la yacencia de las rocas. El buzamiento en la parte sur según el perfil es más suave y la organización geológica es menos caótica.

5.3. Mapa tectónico

El mapa refleja dos condiciones tectónicas fundamentales: un sistema en dirección SW-NE de fallas que incluye las fallas Pinar y otras fallas de sobrecojimiento. El segundo sistema está compuesto de fallas más jóvenes distribuidas en una dirección aproximadamente perpendicular al sistema antes descrito. La Falla Pinar separa las zonas estructuro-faciales Guaniguanico y San Diego de los Baños. El área se encuentra dividida en dos grandes estructuras regionales, Bloque Norte y Bloque Sur. (Anexo: Figura 20)



La zona acuífera regional esta emplazada en la intersección de dos fallas profundas. Una con dirección 80° y 90°, hacia el SE: la Falla Pinar y la otra con dirección SE-NW. En el sistema geológico también están presentes otras fallas paralelas que aportan elementos tectónicos a la estructura regional. El control geológico de la región es principalmente tectónico.

5.1.1 Modelo Físico-geológico de la cuenca del Río San Diego

- La génesis de las aguas de la región, de acuerdo con el modelo, es meteórica, el mecanismo aproximado para su formación es el siguiente: las aguas de lluvias se infiltran en la Sierra de la Guira, a través de los numerosos fenómenos cársticos que allí se presentan y las grietas verticales profundas, hasta alcanzar profundidades de 2 km.
- Las aguas están asociadas a las calizas agrietadas y carsificadas de la Formación Artemisa y surgen a la superficie del terreno en forma de manantiales ascendentes. La composición química de esta agua son bicarbonatadas cálcicas y sulfatadas cálcicas. El origen de estas agua es profundo y un ambiente anaeróbico. Su circulación es por zonas tectónicas de mayor debilidad.
- Desde el punto de vista hidrogeológico, en la región se pueden distinguir varios sistemas de acuíferos (Rodríguez et al, 1989; Fagundo et al, 1993):
 - a) Complejo acuífero de las rocas efusivo-sedimentarias (Los Negros)
 - b) Complejo acuífero asociado a las rocas ultrabásicas de la Formación Manacas
 - c) Complejo acuífero asociado a materiales terrígeno-carbonatados del Grupo Mariel y la Formación Loma Candela;
 - d) Sistema acuífero desarrollado de las calizas del Cretácico (Formación Artemisa);
 - e) Zona de las aguas minerales
 - f) Complejo acuífero asociado a las pizarras y esquistos arcillo-arenosos de la Formación Francisco.
- Las aguas del Río San Diego y los afluentes en la cuenca son dulces del tipo bicarbonatado cálcico estables durante todo el año hidrológico. Todas las aguas en la región son de origen meteórico.



5.2 Análisis hidrológico

5.2.1. Cuenca Bermejales-San Diego

- El área de la cuenca del río San Diego, donde se ejecutaron los trabajos tiene una superficie 251.11km^2 . Para determinar el área de esta parte de la cuenca fue necesario delimitar su contorno. Existe un primer contorno de la cuenca definido por la topografía a través de las líneas divisorias.

Por otra parte, a partir del análisis de la red hidrográfica, se determinaron el orden de los ríos, en el sistema Bermejales-San Diego, que varía del orden 1 hasta el orden 4, incrementándose hacia el sur.

A partir del estudio geomorfológico de la cuenca se definió:

- Forma de la cuenca: alargada y orientada SE-NW,
- Densidad de drenaje de $200\text{m}/\text{km}^2$. Se calcula a partir de la relación, sumatoria total de todas las longitudes de los ríos y arroyos del sistema hidrográfico con el área total de la cuenca. Con este análisis, se puede explicar la dinámica de la cuenca, la estabilidad de la red hidrográfica y por consiguiente el tipo de escorrentía de superficie.
- Río Principal: San Diego,
- Pendiente $0-10^\circ$,
- Longitud 3700m (para el área de los trabajos realizados hasta el cierre en el poblado de Santa Mónica),
- La cuenca del Río San Diego se encuentra delimitada según las divisorias montañosas.

5.2.2. Análisis del drenaje

La importancia del estudio de los sistemas de drenaje radica en el hecho de que el sistema de drenaje brinda información sobre las características físicas de los materiales por donde drenan estas aguas. El sistema de drenaje que se forma en el material depende principalmente de la relación entre la infiltración y el escurrimiento que caracterizan dichos materiales (en el área de estudio a parte de la Formación Artemisa, muchas de las Formaciones son poco porosas o impermeables de forma regional como el caso de la Formación San Cayetano, lo que hace que exista poca interconexión hidráulica entre la infiltración y el escurrimiento, o sea casi todo el agua escurre).



La relación infiltración-escorrimento depende también de las características físicas de los materiales. Existen otras variables que tienen un efecto importante en esa relación, entre ellas el tipo y densidad de la vegetación; el grado natural de humedad del suelo, la composición mineralógica de suelos o rocas, las condiciones geoquímicas especiales producidas por el complejo clima-minerales y otros efectos físico-químicos. Sin embargo, estos efectos están como siempre superpuestos al factor primario de la composición y granulométrica del suelo. Durante períodos relativamente grandes o largos de erosión geológica, ejercen un efecto dominante en el desarrollo de la escorrentía o sistema de drenaje superficial. Un sistema de drenaje uniformemente desarrollado en todos sus detalles indica un material con cierta uniformidad de características físicas. Y a la inversa: la falta de uniformidad en el sistema de drenaje de la región San Diego - Bermejales implica un material no uniforme (heterogeneidad de las Formaciones).

5.2.3. Características del sistema de drenaje

El sistema de drenaje de nuestra región de estudio puede ser descrito en función de sus características geomorfológicas principales.

Las características analizadas fueron las siguientes:

- Densidad o textura
- Grado de uniformidad
- Orientación
- Grado de control (estructural)
- Angularidad

5.2.3.1. La densidad o textura de drenaje

Mide el número de cauces de escurrimiento por unidad de área.

Este sistema es no denso, o de textura gruesa, puesto que permite observar numerosos cauces ampliamente espaciados. Lo que indica la falta de estabilidad (granulometría) la permeabilidad, la relación infiltración-escorrimento, la longitud de la erosión y condiciones climáticas. En general, un drenaje de textura gruesa se observa en Formaciones muy permeables y masivas tales como, Artemisa, Los Negros, Loma Candela y el Grupo Mariel con excepción de San Cayetano, que en la región se comporta como impermeable. En este caso tratamos las formaciones carbonatadas. La textura del sistema del drenaje también es función de la intensidad de la precipitación y de la profundidad relativa de las aguas freáticas.



5.2.3.2. El grado de uniformidad

Describe la homogeneidad relativa de un sistema de drenaje. Un sistema uniforme es similar, independientemente de la fracción del área que se esté observando con respecto a la región.

La zona de estudio presenta una red hidrográfica no uniforme, esta presenta áreas cuyos subsistemas de drenaje individuales son diferentes a los de otras sub-áreas dentro de la zona de estudio, debido probablemente a las diferencias litológicas que se presenta.

5.2.3.3. La orientación

Describe los aspectos direccionales de un sistema de drenaje. La orientación del sistema de drenaje indica el efecto de los factores geológicos (tectónico, litológicos entre otros), además de aquellos de erosión destructiva.

En este caso tenemos que el sistema de estudio se encuentra orientado N25W que coincide con la misma dirección de las Fallas que no pertenecen al sistema de Fallas paralelas a la Falla Pinar.

5.2.3.4. El grado de control

Tiene en cuenta el predominio de orientación de los cauces de drenaje y permite incluir los factores geológicos causantes de dicha orientación. En nuestra zona presentamos informaciones sobre las características físico geográficas descritas en el capítulo II.

La angularidad

Tiene en cuenta el ángulo del cambio direccional de los cauces que integran el sistema de drenaje. Tenemos una angularidad alta lo que implica cambios bruscos y, generalmente, anormales en la dirección de los cauces (fig. 4).

La existencia, el grado, la repetición y otros detalles de la angularidad permitieron suponer y determinar la presencia de condiciones y materiales heterogéneos, fallas escondidas, fracturas, zona de desplazamiento estructural, etc.



Analizando la escorrentía superficial y estudiando el hidrograma de la cuenca se planteó el análisis de las características hidrodinámicas de las cuencas que condicionan el hidrograma producido en ellas.

5.2.4. Relieve

El relieve es un factor importante en el comportamiento de la cuenca, ya que cuanto mayor son los desniveles en la cuenca, mayor es la velocidad de circulación y menor el tiempo de concentración (en los hidrogramas realizados que se presentan, se puede ver que el tiempo de concentración en esta cuenca es 0), lo que implica un aumento del caudal de punta (altos valores de caudales de punta en días lluviosos para esta región de estudio), razón por la cual hay un escurrimiento inmediato en la cuenca.

Las cotas en toda el área oscilan entre los 50-200 m caracterizado por un relieve ondulado y pendientes abruptas, que en dirección al poblado de San Diego de los Baños se hacen más suaves y el relieve más llano.

5.2.5. Hidrodinámica superficial. Hidrología

Hablar de la hidrodinámica superficial es homológamente hablar de **escorrentía superficial**. Nombre que se da al proceso al cual el agua procedente de la lluvia circula por la superficie y se concentra en los cauces de los ríos. La escorrentía superficial es función de las características topográficas, geológicas, climáticas y de la vegetación de las cuencas y está íntimamente ligada a la relación entre aguas superficiales y subterráneas.

5.2.6. Descripción del proceso de escorrentía

En una cuenca cuando se inicia un proceso de lluvia (**precipitación**). Las primeras gotas de lluvia son retenidas y almacenadas por las hojas y tallos de la cubierta vegetal, a partir de un cierto límite las gotas comienzan a alcanzar el suelo y después de un breve período de tiempo, casi todas las gotas alcanzan el suelo.

En un segundo proceso, el suelo a través de sus capas de depósitos de restos vegetales y sobre todo en sus depresiones, almacena una cierta cantidad de agua. Es decir, se inicia el proceso de percolación del agua a las capas inferiores (**infiltración**).



Cuando la capacidad de almacenamiento del suelo, está en el límite, se inicia el proceso de circulación superficial del agua. En esta circulación superficial se pueden distinguir dos partes:

- una correspondiente al **flujo subsuperficial** o mejor llamado hipodérmico, que corresponde a la capa de agua que circula próxima al suelo;
- Y otra al **flujo superficial** propiamente dicho, que circula con mayor velocidad. Es este último el que genera realmente lo que se entiende en ingeniería como escorrentía propiamente dicha.

La ecuación de balance hídrico final se expresó como:

$$P = I + E + F:$$

Siendo:

P = precipitación total;

I = Infiltración;

E = evaporación y evapotranspiración;

F = Escorrentía;

5.2.7. Cálculo de Evapotranspiración Potencial

Evapotranspiración ET es la consideración conjunta de dos procesos diferentes: la evaporación y la transpiración.

Se produce evaporación desde:

- a) la superficie del suelo y la vegetación inmediatamente después de la precipitación.
- b) Desde las superficies de agua (ríos, lagos, embalses). (Javier S. S. Román, F., *Mayo 2006*)

Como son difíciles de medir por separado, y además en la mayor parte de los casos lo que interesa es la cantidad total del agua que se pierde a la atmósfera sea del modo que sea, se consideran conjuntamente bajo el concepto mixto de ET.

Al analizar el balance hídrico de la cuenca, será necesario disponer de datos de precipitaciones y de escorrentías. La diferencia P -escorrentía total se denomina “déficit de escorrentía” queriendo decir simplemente “la precipitación que no ha generado escorrentía”.

El cálculo de evapotranspiración potencial se realizó aplicando el algoritmo de Thornthwaithe a las temperaturas mensuales registradas en las subcuencas 1,2,3 y 4



datos obtenidos de la Estación “La Amistad”, los valores promedio de temperatura mensual fue de 26,3°C.

Se propuso el siguiente método de distribución para determinar los valores de evapotranspiración mensual áreal para el sistema:

a) Distribución según Isotermas: el algoritmo utilizado según esta distribución fue:

ETPS donde ETPS, son los valores de evapotranspiración potencial mensual del sistema.

5.2.8. Calculo de la ETP mediante la fórmula de Thornthwaite:

1. se calculó un “índice de calor mensual” (i) a partir de la temperatura media mensual (t):

$$i = \left(\frac{t}{5} \right)^{1,514}$$

La temperatura media del mes de Enero es de 21,8°C:

$$i_{Enero} = \left(\frac{21,8}{5} \right)^{1,514}$$

$$i_{Enero} = 9,29$$

La temperatura media del mes de Febrero es de 21,6°C:

$$i_{Febrero} = 9,16$$

La temperatura media del mes de Marzo es de 22,4°C:

$$i_{Marzo} = 9,68$$

La temperatura media del mes de Abril es de 23,5°C:

$$i_{Abril} = 10,41$$

La temperatura media del mes de Mayo es de 25,5°C:

$$i_{Mayo} = 11,78$$

La temperatura media del mes de Junio es de 26,7°C:

$$i_{Junio} = 12,63$$

La temperatura media del mes de Julio es de 26,4°C:

$$i_{Julio} = 12,41$$

La temperatura media del mes de Agosto es de 26,9°C:

$$i_{Agosto} = 12,77$$

La temperatura media del mes de Septiembre es de 26,6°C:



$$i_{\text{Septiembre}} = 12,56$$

La temperatura media del mes de Octubre es de 23°C:

$$i_{\text{Octubre}} = 10,08$$

La temperatura media del mes de Noviembre es de 21°C:

$$i_{\text{Noviembre}} = 8,78$$

La temperatura media del mes de Diciembre es 19°C:

$$i_{\text{Diciembre}} = 7,55$$

2. se calculó el “índice de calor anual” (I) sumando los doce valores de i :

$$I = \sum i$$

$$I = \sum (9,29 + 9,16 + 9,68 + 10,41 + 11,78 + 12,63 + 12,41 + 12,77 + 12,56 + 10,08 + 8,78 + 7,55)$$

$$I = 127,1$$

3. Se calculó la ETP mensual “sin corregir” mediante la formula:

$$ETP_{\text{sin corregir}} = 16 \left(\frac{10t}{I} \right)^a$$

Donde:

$ETP_{\text{sin corregir}}$ = ETP mensual en mm/mes para meses de 30 días y 12 horas de sol (teóricas);

t = temperatura media mensual, °C;

I = índice de calor anual;

$$a = 675.10^{-9}.I^3 - 771.10^{-7}.I^2 + 1792.10^{-5}.I + 0,49239$$

$$a = 1,38 - 1,24 + 2,27 + 0,49$$

$$a = 2,9$$

Entonces:

$$ETP_{\text{sin cor. Enero}} = 16 \left(\frac{218}{127,1} \right)^{2,9}$$

$$ETP_{\text{sin cor. Enero}} = 76,49 \text{ mm}$$

$$ETP_{\text{sin cor. Febrero}} = 74,47 \text{ mm}$$

$$ETP_{\text{sin cor. Marzo}} = 82,75 \text{ mm}$$

$$ETP_{\text{sin cor. Abril}} = 95,1 \text{ mm}$$



Comportamiento hidrológico de los flujos que drenan la cuenca de San Diego-Bermejales
Bruno Eddy Lima MADRE DEUS

$$ETP_{\sin \text{ cor. Mayo}} = 120,52mm$$

$$ETP_{\sin \text{ cor. Junio}} = 137,71mm$$

$$ETP_{\sin \text{ cor. Julio}} = 133,27mm$$

$$ETP_{\sin \text{ cor. Agosto}} = 140,72mm$$

$$ETP_{\sin \text{ cor. Septiembre}} = 136,22mm$$

$$ETP_{\sin \text{ cor. Octubre}} = 89,35mm$$

$$ETP_{\sin \text{ cor. Noviembre}} = 68,63mm$$

$$ETP_{\sin \text{ cor. Diciembre}} = 51,34mm$$

4. Corrección para el N° de días del mes y el n° de horas del sol:

$$ETP = ETP_{\sin \text{ corr}} \frac{N}{12} \times \frac{d}{30}$$

Donde:

ETP= evapotranspiración potencial corregida

N= número máximo de horas de sol, dependiendo del mes y de la latitud

d= número de días del mes

$$ETP_{\text{Enero}} = 76,49 \frac{11}{12} \frac{31}{30}; \quad ETP_{\text{Enero}} = 71,45mm$$

$$ETP_{\text{Febrero}} = 74,47 \frac{11,5}{12} \frac{30}{30}; \quad ETP_{\text{Febrero}} = 71,36mm$$

$$ETP_{\text{Marzo}} = 82,75 \frac{12}{12} \frac{31}{30}; \quad ETP_{\text{Marzo}} = 85,5mm$$

$$ETP_{\text{Abril}} = 95,1 \frac{12,6}{12} \frac{30}{30}; \quad ETP_{\text{Abril}} = 99,85mm$$

$$ETP_{\text{Mayo}} = 120,52 \frac{13,1}{12} \frac{31}{30}; \quad ETP_{\text{Mayo}} = 135,95mm$$

$$ETP_{\text{Junio}} = 137,71 \frac{13,3}{12} \frac{30}{30}; \quad ETP_{\text{Junio}} = 152,62mm$$

$$ETP_{\text{Julio}} = 133,27 \frac{13,2}{12} \frac{31}{30}; \quad ETP_{\text{Julio}} = 151,48mm$$

$$ETP_{\text{Agosto}} = 140,72 \frac{12,8}{12} \frac{31}{30}; \quad ETP_{\text{Agosto}} = 155,1mm$$

$$ETP_{\text{Septiembre}} = 136,22 \frac{12,3}{12} \frac{30}{30}; \quad ETP_{\text{Septiembre}} = 139,62mm$$



Comportamiento hidrológico de los flujos que drenan la cuenca de San Diego-Bermejales
Bruno Eddy Lima MADRE DEUS

$$ETP_{Octubre} = 89,35 \frac{11,7}{12} \frac{31}{30} ;$$

$$ETP_{Octubre} = 90,02mm$$

$$ETP_{Noviembre} = 68,63 \frac{11,2}{12} \frac{30}{30} ;$$

$$ETP_{Noviembre} = 64,05mm$$

$$ETP_{Diciembre} = 51,34 \frac{10,9}{12} \frac{31}{30} ;$$

$$ETP_{Diciembre} = 48,18mm$$



5.2.9. Mediciones de Precipitación

Los factores regionales o locales determinan aspectos tales: como la mayor humedad de algunas zonas y la mayor frecuencia de lluvias en las barreras montañosas. Este parámetro se puede considerar como el más importante que interviene en el balance hídrico y la exactitud en su medición y su evaluación es determinante en el resultado.

La precipitación temporal para el sistema se obtuvo a partir de datos recopilados de la Estación Termoclimática “La Amistad”. Dada la no homogeneidad temporal y espacial en los datos disponibles a escala de sistema, se propuso como hipótesis de partida un mínimo de 4 subcuencas para realizar los cálculos.

Bajo este condicionante, los períodos obtenidos fueron octubre, noviembre y diciembre.

Pero también se dispuso de datos a niveles mensuales desde 2001 al 2006 lo que dio más confiabilidad al estudio de esta variable en cuanto a sus tendencias anuales.

Los datos observados se presentan en la tabla anexa No. (5)

5.3. Parámetros cuantitativos del escurrimiento superficial.

El caudal medio para el año hidrológico fue calculado a partir de la formula siguiente:

$$Qm = \frac{\sum_{i=1}^n Qi}{\sum_{i=1}^n ni} \quad \text{Donde,}$$

Qm. Escurrimiento medio anual.

Qi. Suma de los caudales mensuales de la serie analizada un año hidrológico.

n. número de meses de las observaciones.

5.3.1. Cuenca del Río San Diego

$$Qm_{SD-B} = \frac{\sum (0,73 + 2,62 + 1,41 + 1,54 + 17,26 + 49,68 + 24,31 + 46,37 + 61,93 + 24,90 + 1,89 + 2,16)}{12}$$

$$Qm_{SD-B} = 19,56l / s$$

En resumen los cálculos fueron realizados basados en las siguientes formulas: caudal específico, la lámina de escurrimiento y el volumen.

$$y_0 = 31.54 * 10^6 * M_0.$$



$$M_0 = \frac{y_0}{31.54 * 10^6}$$

$$w_0 = 1000 * y_0 * A.$$

5.3.2. Caudal específico de la cuenca

Caudal en litros por segundo (l/s) que escurre por cada km² de la cuenca.

$$M_o = \frac{Qm \text{ l/s}}{A \text{ km}^2}$$

$$M_o = \frac{19,59}{251.111}$$

$$M_o = 0,078 \text{ l/s/km}^2$$

5.3.3. Volumen de escurrimiento anual

Volumen real que llega hasta un cierre determinado (Poblado de Santa Mónica).

$$w_0 = 31.54 * 10^6 Qm$$

$$w_0 = m^3$$

$$w_0 = 31,54 * 10^6 . 0,0001959$$

Donde 31.54*10⁶ número de segundo al año.

$$w_0 = 6178,686 m^3$$

5.3.4. Lámina de escurrimiento anual

$$y_0 = \frac{31.54 * 10^6 * Qm}{A}$$

$$y_0 = mm$$

$$y_0 = \frac{31,54 * 10^6 * 19590}{251111455}$$

$$y_0 = 2460,5 \text{ mm}$$



5.4. Balance hídrico superficial

El concepto de **balance hídrico** que quiere decir, el equilibrio entre todos los recursos hídricos que ingresan al sistema y los que salen del mismo, en un intervalo de tiempo determinado. Sintéticamente puede expresarse por la fórmula:

$$Caudal_{t+1} = Caudal_t + \sum_{i=1}^N Recarg a_i - \sum_{j=1}^N Descarg a_j$$

El estado inicial de la cuenca o parte de esta, para efecto del balance hídrico, puede definirse como, la disponibilidad actual de agua en las varias posiciones que esta puede asumir, como por ejemplo: volumen de agua circulando en los ríos, arroyos y canales; volumen de agua almacenado en lagos, naturales y artificiales; humedad del suelo; todo lo cual puede definirse también como la disponibilidad hídrica de la cuenca.

Las **entradas de agua** a la cuenca hidrográfica pudieron darse de las siguientes formas:

- Precipitaciones: lluvias;
- Aporte de aguas subterráneas desde cuencas hidrográficas colindantes, en efecto, los límites de los acuíferos subterráneos no siempre coinciden con los límites de las partes o divisorias de aguas que separan las cuencas hidrográficas;

Las **salidas de agua** pudieron darse de las siguientes formas:

- Evapotranspiración;
- Evaporación desde superficies líquidas, como lagos, estanques, pantanos, etc.;
- Infiltraciones profundas que van a alimentar acuíferos;
- Derivaciones hacia otras cuencas hidrográficas;
- Derivaciones para consumo humano y en la industria;
- Salida de la cuenca, hacia el cierre o mar.

Balances Hídricos mensual 2001-2006, diario Octubre-Diciembre e ideal para un año hidrológico (anexo: tablas 5 y 6 y 7)



5.5. Hidrogramas de la cuenca

Se denomina **hidrograma** de una cuenca en un punto al registro de caudales circulantes en función del tiempo. La distribución de lluvia en función de t se denomina **hietograma**.

Se denomina **tiempo de lluvia** al período de tiempo en el que la lluvia produce escorrentía. (Gráficos pág. 21 al 24). Se realizó el estudio de hidrogramas con el fin de caracterizar la hidrodinámica de la cuenca.

En el hidrograma de la fig. 21 se representa la respuesta observada en el Río de San Diego ante un largo episodio meteorológico de 6 años, así como la repartición de las precipitaciones tomadas en la Estación “La Amistad” correspondientes a períodos que tuvieron lugar a partir de 2001 a 2006.

En el hidrograma de la fig. 23 se representa la respuesta observada en el Río de San Diego ante un corto episodio meteorológico de 3 meses, así como la repartición de las precipitaciones tomadas en la Estación “La Amistad” correspondientes a períodos que tuvieron lugar a partir de Septiembre a Diciembre 2004.

En el hidrograma de la fig. 24 se representa la respuesta idealizada del Río de San Diego ante cualquier episodio anual.

En los hidrogramas se distinguen las siguientes partes:

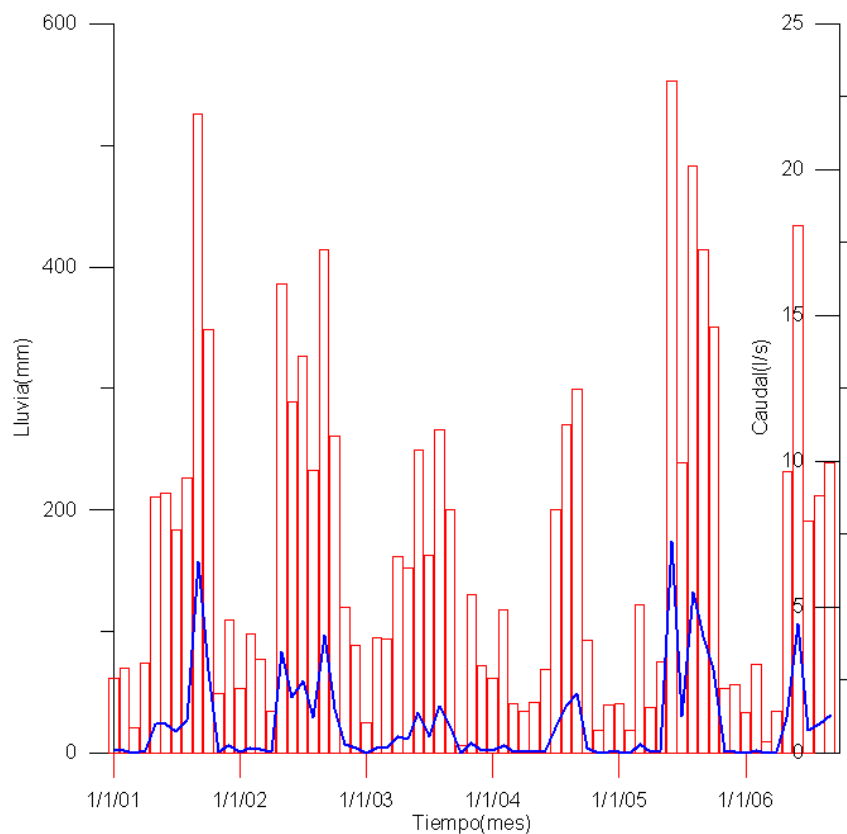


Figura 21: Hidrograma de la cuenca San Diego, para los años 2001-2006

a) Caudal de base:

Corresponde al caudal que aporta el sistema acuífero subterráneo en periodos secos para mantener el caudal ecológico del Río que garantice la vida en el cauce.

Periodo 2001-2006: 0,9 l/s

c) Punta del hidrograma.

Es el punto de caudal máximo.

La punta de todos los hidrogramas coinciden con el día 16 de Octubre

Periodo 2001-2006: 75 l/s para 200mm de lluvia

g) Tiempo de Base:

Es el tiempo transcurrido entre el inicio de la curva de concentración y el punto de inflexión que identifica el final de la curva de bajada.

Período 2001-2006: 6 meses

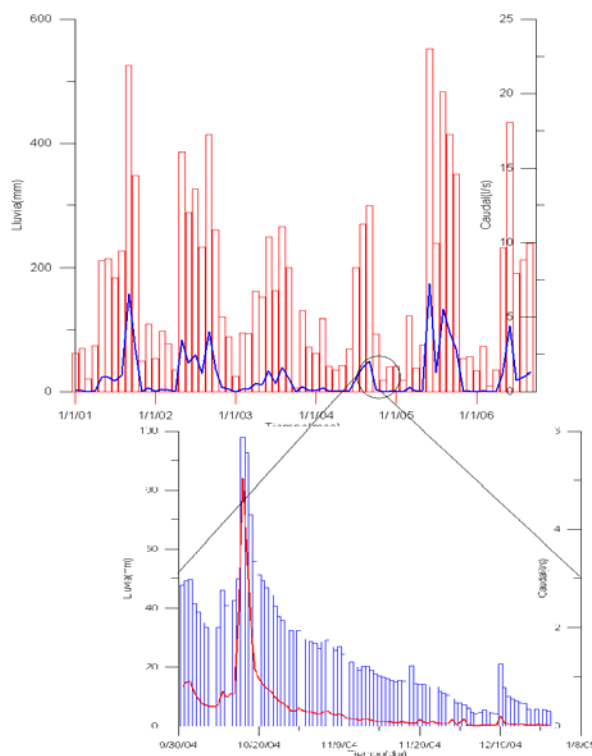


Figura 22: Grafico explicativo de los períodos de trabajo en la Cuenca San Diego

Comportamiento hidrológico de los flujos que drenan la cuenca de San Diego-Bermejales
Bruno Eddy Lima MADRE DEUS

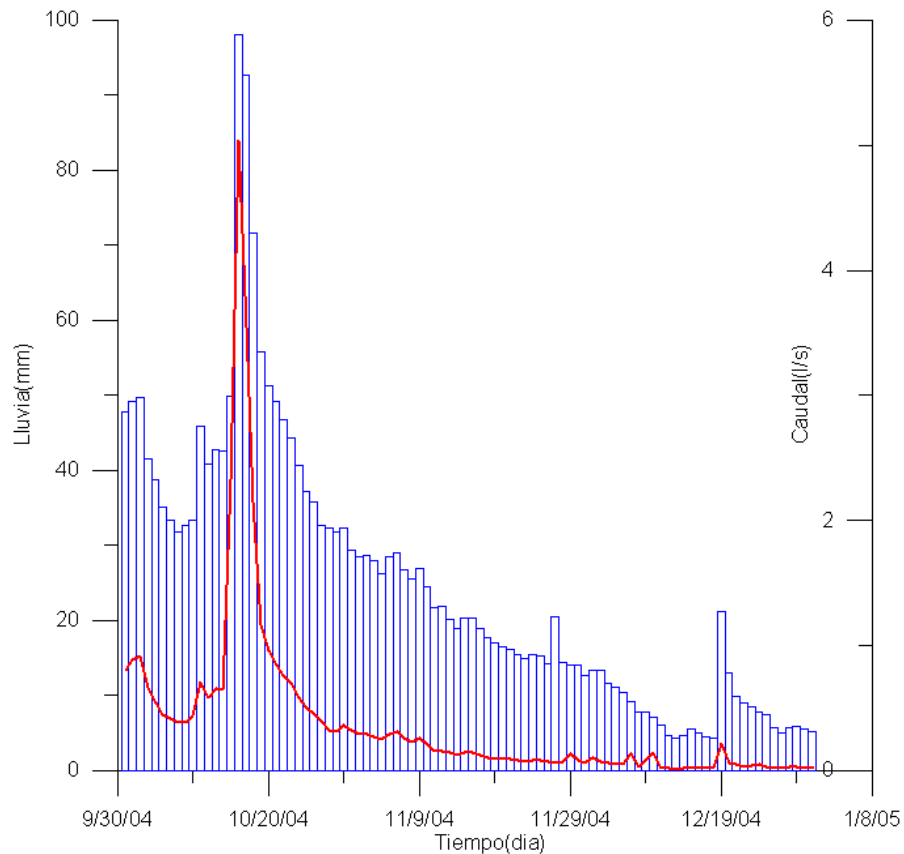


Figura 23: Hidrograma de la Cuenca San Diego para los meses Octubre-Diciembre del año 2004.

a) Caudal de base:

Periodo Octubre-Diciembre 2004: 0,5 l/s

c) Punta del hidrograma:

Período Octubre-Diciembre 2004: 50 l/s para 85mm de lluvia

g) Tiempo de Base:

Periodo Octubre-Diciembre 2004: 4 días

h) Tiempo de concentración:

Es el tiempo transcurrido desde el final de la lluvia neta hasta el momento en que acaba la curva de bajada, es decir, el final de la escorrentía superficial.

Como la escala del trabajo, con respecto al tiempo, es “días”, tenemos que el tiempo de concentración es 0 dado que la respuesta del río después de las lluvias es inmediata tanto para las 4 subcuencas como para la cuenca de forma general.



Comportamiento hidrológico de los flujos que drenan la cuenca de San Diego-Bermejales
Bruno Eddy Lima MADRE DEUS

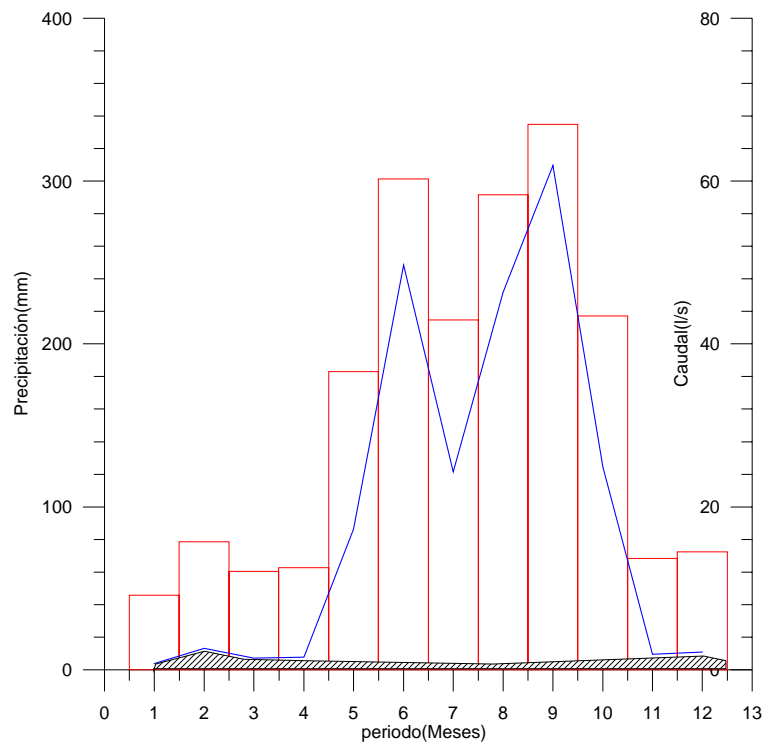


Figura 24: Hidrograma final sintetizado anual de la Cuenca del Río San Diego: la zona subrayada corresponde al aporte subterráneo base anual.

a) Caudal de base:

Anual: 0,8 l/s

c) Punta del hidrograma:

Anual: 70 l/s para 180 mm lluvia

g) Tiempo de Base:

Anual: 6 meses

f) Curva de crecida

Cuenca San Diego hasta el cierre Santa Mónica

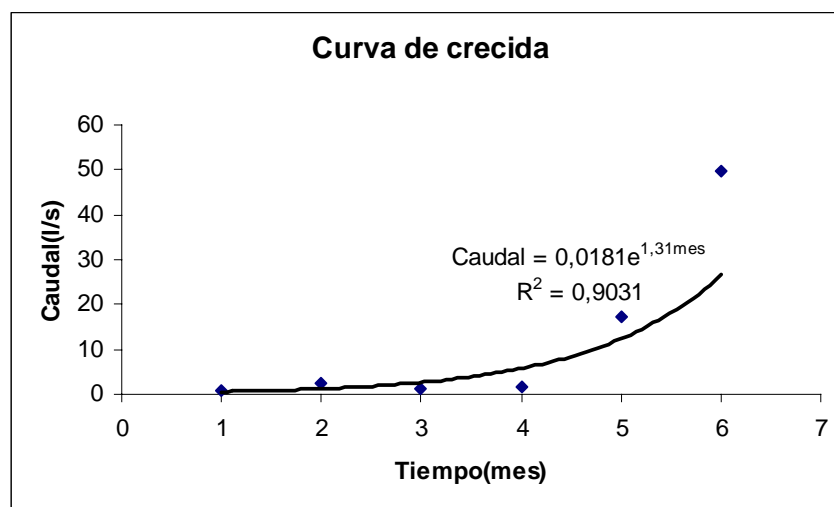


Figura 25: Curva de crecida estimada de la Cuenca San Diego



e) Curva de agotamiento.

Corresponde a la parte final de la curva de bajada del hidrograma y contiene los caudales subterráneos que corresponden a menores velocidades de circulación del agua. Los caudales hipodérmicos o sub-superficiales son intermedios a los anteriores y sus valores mayores corresponden al entorno del punto de inflexión de la curva de bajada del hidrograma.

En cualquiera de los casos, la ecuación que refleja la disminución del caudal con el tiempo es del tipo:

$$Q_t = Q_i e^{-\alpha t}, \text{ Ecuación de Maillet.}$$

Donde:

Q_t = caudal en el instante t

Q_i = caudal en el instante t_i

t = tiempo que ha transcurrido desde t_i

E = número e (2,718...)

α = constante que depende del cuerpo de material poroso que estamos considerando en la Cuenca principal.

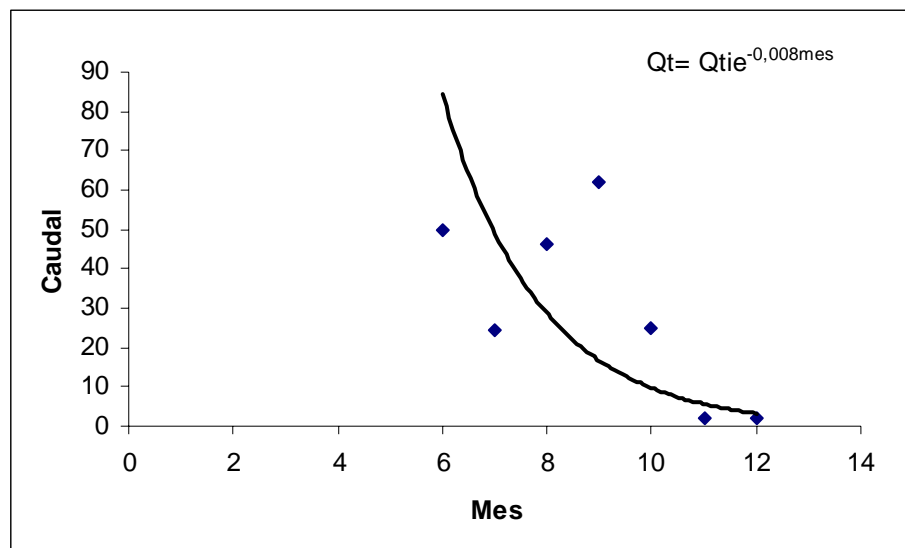


Figura26: curva de agotamiento para la Cuenca del Río San Diego, en la escala mensual.

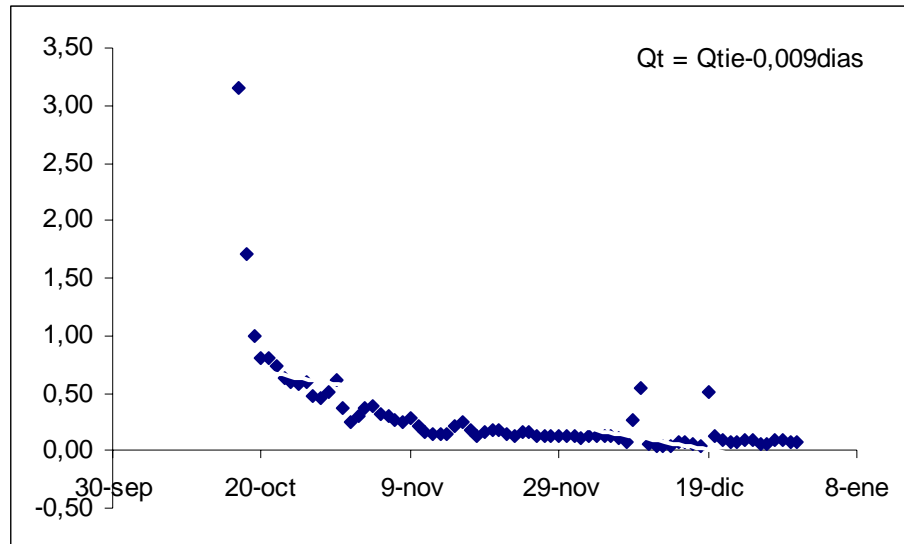


Figura 27: Curva de agotamiento de la sub cuenca 1.

Eje x: escala en días

Eje y: caudal (l/s)

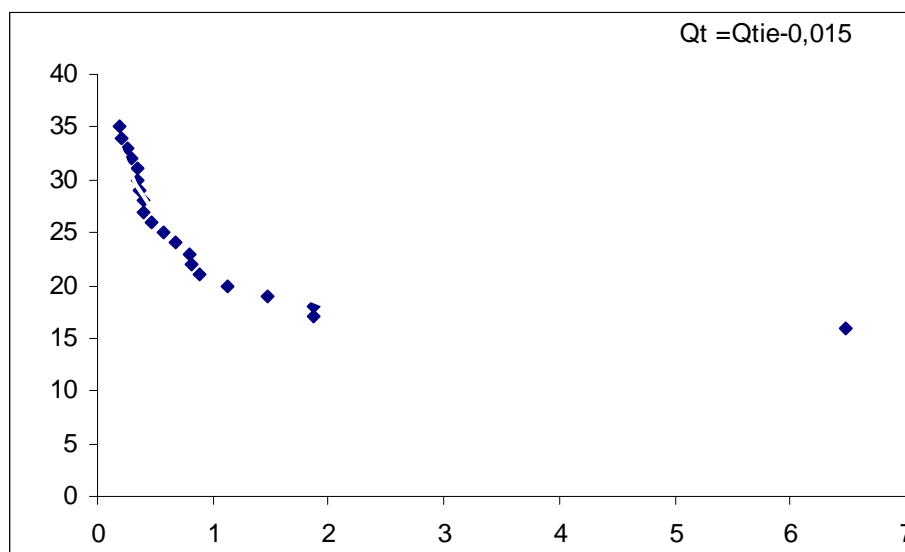


Figura 28: Curva de agotamiento de la sub cuenca 2.

Eje x: escala en días

Eje y: caudal (l/s)

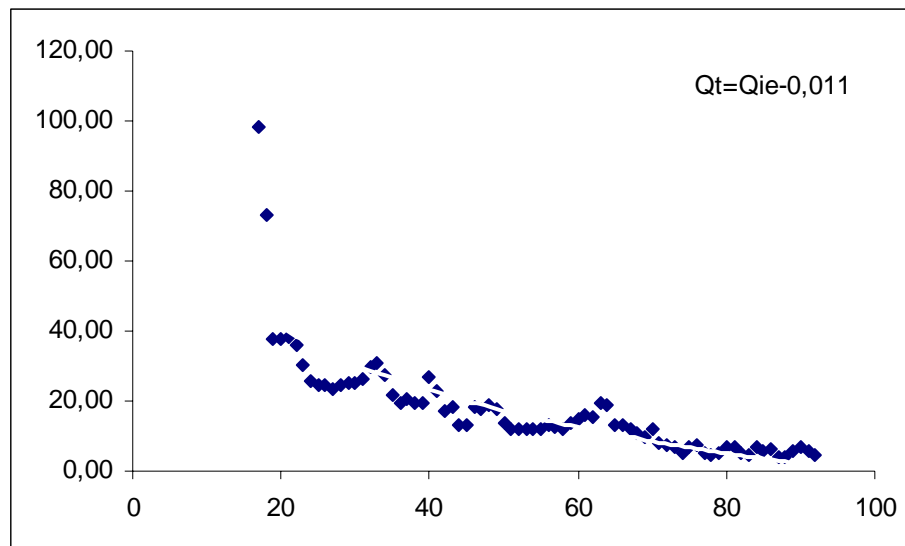


Figura 29: Curva de agotamiento de la sub cuenca 3.

Eje x: escala en días

Eje y: caudal (l/s)

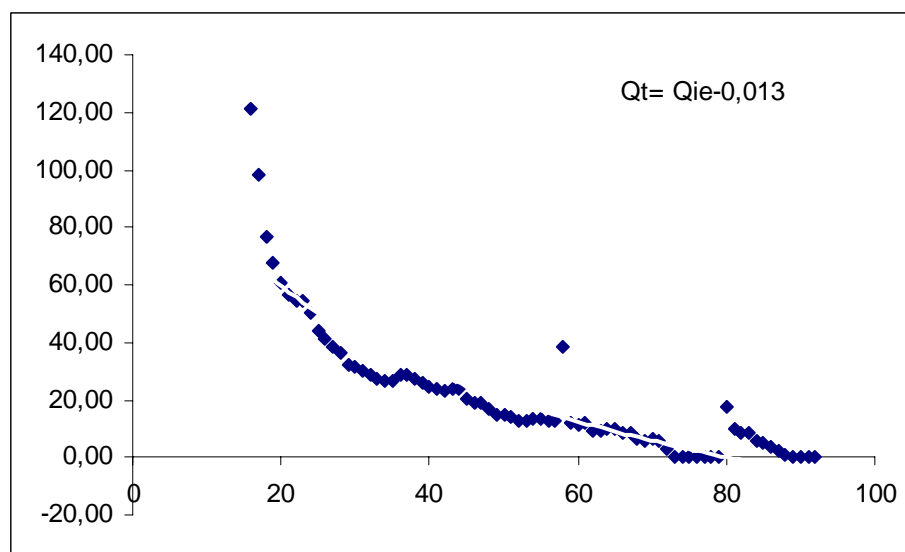


Figura 30: Curva de agotamiento de la sub cuenca 4.

Eje x: escala en días

Eje y: caudal (l/s)

5.5.1. Análisis de los hidrogramas (ver gráficos)

Se pudieron hacer varias observaciones a la vista de estos gráficos incluyendo aspectos referentes a la organización del drenaje:

- Una serie sucesiva de lluvias origina una serie sucesiva e inmediata de crecidas. La primera precipitación “importante” de la serie provocó instantáneamente un rápido y notable aumento del caudal, que se va a mantener mientras ocurre la precipitación y algunas pocas horas después dentro de un estrecho margen, viéndose poco afectado por las posteriores lluvias de la serie. Los diversos episodios lluviosos originan al comienzo un aumento de caudal hasta aproximadamente 6 l/s, para mantenerse y descender, muy rápidamente, hasta que ocurra otros pequeños nuevos episodios para mantener el río con un caudal mínimo, pues el aporte subterráneo es mínimo e insuficiente para mantener el río con caudal por mas de un mes. Pequeñas precipitaciones aisladas no modifican la evolución del caudal.
- Pequeñas precipitaciones pueden provocar crecidas relativamente más importantes que otras más grandes, según el caudal que en esos momentos es drenado por la surgencia. En periodos de pocas lluvias (noviembre-abril) solamente precipitaciones con una cierta importancia llegan a ejercer influencia sobre el caudal del Río.
- Otra observación importante fue la forma de crecidas y decrecidas. Tanto en periodos de estiaje como en periodos de altas aguas, las oscilaciones del caudal son bruscas y características: crecidas instantáneas y decrecidas bastante rápidas. En el caso de las fig. 23 se observa decrecidas escalonadas y no es exactamente consecuencia del escalonamiento de las precipitaciones, sino que debe relacionarse con la organización del drenaje en el sistema, o sea el sistema aquí es más heterogéneo y menos organizado.
- El análisis de los hidrogramas señala que el Río San Diego es un río “aportador o Influyente” con respecto a la cuenca San Diego-Bermejales y a los acuíferos presentes en la zona de estudio.

5.6. Caracterización Hidroquímica

Este tema se refiere a la hidroquímica de las aguas superficiales. Más del 99% de las sustancias disueltas en un agua no contaminada corresponde a las siguientes:

Tabla 7: Sustancias disueltas en las aguas (Iones mayoritarios)

Aniones	Cationes	No iones
Cl^{-}	$Na^{+} + K^{+}$	H_3SiO_4
SO_4^{2-}	Mg^{2+}	CO_2
CO_3H^{-}	Ca^{+}	(O_2)



Estos componentes mayores en las aguas subterráneas se encuentran siempre en concentraciones $>1\text{mg/l}$ el NO_3^- generalmente se encuentra en un rango mayor, pero siempre se debe presumiblemente a una contaminación orgánica.

Los componentes menores (1 a $0,1\text{mg/L}$ en aguas subterráneas) y los componentes trazas suelen estar en concentraciones inferiores a $0,1\text{mg/L}$.

Ver anexo: tabla 8: concentraciones de elementos de la región expresados en mg/L
Es ventajoso expresar los resultados en miliequivalentes por litro, porque números iguales representan iguales combinaciones de peso, por ejemplo, 22.997 gramos de Na^+ reaccionarán con 35.457 gramos de Cl^- , ni más ni menos.

Se utilizaron coeficientes que se utilizan para convertir directamente de mg/l a meq/l , (anexo: tabla 9):

El agua de esta zona es de tipo bicarbonatada cálcica de forma general aunque existen otros tipos de aguas.

5.6.1. Condición de electroneutralidad

La suma de aniones ha de ser igual a la suma de cationes (expresados en meq/l). Lógicamente siempre hay un cierto error que se calcula por la fórmula:

$$\text{Error} = \frac{\sum \text{aniones} - \sum \text{cationes}}{\sum \text{aniones} + \sum \text{cationes}} \times 100$$
$$\text{Error} = \frac{\sum (\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-} + \text{CO}_3\text{H}^-) - \sum (\text{Na}^+ + \text{K}^+ + \text{Mg}^{2+} + \text{Ca}^+)}{\sum (\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-} + \text{CO}_3\text{H}^-) + \sum (\text{Na}^+ + \text{K}^+ + \text{Mg}^{2+} + \text{Ca}^+)} \times 100$$

Subcuenca 1

$$\text{Error}_1 = \frac{\sum (0.9 + 27.01 + 4.52) - \sum (10.62 + 4.27 + 21.4)}{\sum (0.9 + 27.01 + 4.52) + \sum (10.62 + 4.27 + 21.4)} \times 100$$
$$\text{Error}_1 = \frac{32.43 - 36.29}{32.43 + 36.29} \times 100$$
$$\text{Error}_1 = 5.61\%$$

Los cálculos efectuados para las siguientes subcuencas se basaron en el mismo procedimiento que la subcuenca 1, por lo que se presenta solamente los resultados:



Subcuenca 2

$$Error_2 = 2.98\%$$

Subcuenca 3

$$Error_3 = 3.55\%$$

Subcuenca 4

$$Error_4 = 2.54\%$$

Los errores son aceptables para un límite admisible de (10%).

5.6.2. Análisis de temperatura

Esta variable se analizó a nivel mensual, considerando los valores medios, para las subcuencas del río San Diego.

La información seleccionada, corresponde a la Estación Climática “La Amistad” ubicada dentro de la zona de estudio. Con dicha información, se realizó el análisis regional de esta variable con el fin de conocer el comportamiento y distribución espacial y temporal.

Se procedió a la determinación de la temperatura a nivel mensual: Analizada la información a nivel mensual (octubre, noviembre y diciembre), se pasó a completar la serie de datos mensuales, para lo cual se procedió de la misma forma que en el análisis de la precipitación, determinándose los diferentes factores de corrección, mediante los cuales se determinarán los valores de las temperaturas medias mensuales para cada una de las estaciones.

Temperatura media Mensual para un año hidrológico:

meses	Temperatura(°C)
1 enero	21,8
2 febrero	21,6
3 marzo	22,4
4 abril	23,5
5 mayo	25,5
6 junio	26,7
7 julio	26,4
8 agosto	26,9
9 septiembre	26,6
10 octubre	23
11 noviembre	21
12 diciembre	19

Tabla 13: temperaturas medias mensuales



Así la temperatura media anual es 23,7°C

5.6.3. Análisis de Conductividad Eléctrica del agua superficial

La Conductividad Eléctrica es la facilidad del agua para conducir la corriente eléctrica. El agua destilada es prácticamente aislante, pero la conductividad aumenta rápidamente con la cantidad de iones disueltos. Su importancia se basa en que se mide muy fácilmente y nos indica aproximadamente la mineralización del agua.

En la zona de estudio la conductividad eléctrica varía muy poco o sea es casi constante con respecto al tiempo pero espacialmente varía (La CE en la zona varía de 100 a 1200 mS/cm en las zonas medidas), y según el mapa que se muestra en la figura (32) del anexo, esto puede ser debido a que las aguas residen muy poco tiempo en las rocas por la que transita y casi no disuelven nada los minerales que componen a estas rocas, razón por la cual las zonas más cercanas al afluente de mayor importancia posean menores tendencias de conducir corriente.

Comportamiento del pH de las aguas superficiales

Mide la acidez del agua. Es igual a $-\log (H^+)$.

En las aguas naturales oscila entre 5,5 y 8,5, en aguas subterráneas habitualmente entre 6,5 y 8,5.

En la zona de estudio, en las surgencias analizadas, el pH varía de 6,3 a 7,3 y tienen una tendencia de aumento del pH en dirección aguas abajo. Esto se puede verse en el anexo: Fig. 31.



Conclusiones

- Los caudales que drenan las subcuencas hasta el sierre en el poblado de Santa Monica al río San Diego es de $Qm_{SD-B} = 19,56 l / s$;
- Los mayores caudales se presentan en septiembre (61,93 l/s) y los menores en el mes de enero (0,73 l/s). A nivel anual la cuenca San Diego-Bermejales aporta al escurrimiento superficial un $Mo = 0,7801 l/seg/ km^2$
- A nivel mensual la cuenca San Diego presenta una precipitación media de 160,87 mm y una evapotranspiración media de 105,43 mm. Lo que significa un superávit de 55,44 mm.
- Considerando que el caudal medio mensual del río San Diego en el área de estudio se comporta en el orden de los 19,56 l/s valor que equivale a 2,46 mm, lo que significa que en la cuenca del río del mismo nombre existe un superávit del recurso hídrico.
- Hay que considerar que la disponibilidad del recurso hídrico ha sido referida a las aguas superficiales y solo esta referido a la parte de la zona San Diego de los Baños y Bermejales no considerando los aportes y demandas de las nacientes de la cuenca que se encuentra en otros territorios de la Sierra de Rosario.
- Con los valores medidos en la Estación “La Amistad”, bajo las condiciones actuales y naturales, el río San Diego satisface las demandas hídricas existentes en la cuenca.
- El hecho de que pequeñas precipitaciones, lleguen a influenciar la evolución de caudales en la surgencia es indicativo que el efecto filtro que el sistema ejerce sobre ellos es insuficiente. No son necesaria una cierta cantidad de lluvias para provocar aumento de caudal. Este filtraje insuficiente puede ser debido a las características de las rocas que se encuentran en las zonas superficiales.
- La respuesta ante las precipitaciones, cuando aquella existe es muy rápida. A la vista de los hietogramas e hidrogramas no se observan desfase desde el comienzo de la lluvia hasta el comienzo del aumento de caudal en la surgencia. La instantaneidad de la respuesta y su amplitud indica una ausencia de la infiltración y almacenamiento, de parte del agua precipitada o por el contrario también pudiera ser debido a una infiltración extremadamente rápida que es posible debido al gran número de fracturas existente en el área de estudio.
- La relación acuífero-río esta explicada por la caracterización arriba mencionada del río San Diego como un río Aportador o Influyente, dado que esta corriente es la que alimenta a los acuíferos.
- El análisis hidroquímico en la surgencia ha puesto de manifiesto que generalmente, las aguas drenadas durante las crecidas corresponden a aguas bicarbonatadas cálcicas.



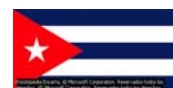
Recomendaciones

- Se recomienda hacer un estudio de hidrogramas con la escala de tiempo a nivel de horas con el objetivo de esclarecer mejor las propiedades hidrodinámicas de la cuenca teniendo en cuenta que el tiempo de concentración, a nivel de una observación, basada en meses o días casi no hay desplazamiento entre el grafico de lluvia con respecto al caudal, pero se sabe que en realidad esto no ocurre así, y que aunque sea muy rápido la respuesta del caudal, sí debe haber un tiempo de concentración, y esto lo podemos determinar a una escala de observación mayor de la que se trabajó, se quiere decir horas.
- Se recomienda un estudio hidroquímico profundo a partir del control temporal de la conductividad eléctrica del agua combinado con los hidrogramas, realizando esta tarea en las surgencias del macizo de Sierra del Rosario durante un periodo de un año como mínimo, incluyendo las fuertes lluvias, para poner de manifiesto la diferente importancia relativa de la infiltración rápida y lenta, en función de la intensidad de la precipitación, así como el bajo grado de karstificación funcional del macizo. Por otra parte, la forma que tomará la curva de distribución correspondiente a los valores determinados en cada surgencia daría buena idea de la organización del drenaje.
- Se recomienda usar esta metodología al estudio de otras cuencas con la finalidad de conocer mejor el comportamiento hidrodinámico de otras cuencas bien como la hidroquímica y el balance hídrico. También será útil la aplicación de la misma para la comparación con acuíferos que no sean cársticos, y así poder ampliar más el conocimiento de la hidrología e hidrogeología del país y de una forma general también.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. **Antigüedad I.** (1986 A); APORTACIÓN AL CONOCIMIENTO DE LA CARACTERISTICAS HIDRODINAMICAS DEL MACIZO DE ARAMOTZ PARTIR DEL CONTROL TEMPORAL EN SUS SURGENCIAS; Dpto. Geomorfología-geotectónica. Facultad de ciencias. Universidad del País Vasco. España.
2. **Antigüedad I.** (1986 B); IDENTIFICACION DEL GRADO DE ORGANIZACIÓN DE UN ACUIFERO CARBONATADO A PARTIR DE LA INTERPRETACION DE LOS HIDROGRAMAS. SISTEMA KARSTICO DE ARAMOTZ (BIZCAIA); Dpto. Geomorfología-geotectónica. Facultad de ciencias. Universidad del País Vasco. España.
3. **Arévalo, Héctor Vera;** BALANCE HIDRICO SUPERFICIAL DE LAS CUENCAS DE LOS RIOS TUMBES Y ZARUMILLA; Dirección General de hidrología y Recursos Hídricos. España.
4. **Castillo J.R.F.; Rivera J. C.; Antigüedad I.; Muñoz M. S.; Hernández P. G.; Rodríguez C. M.; Morejón J. P.; Peláez García R.;** (2004) CARACTERIZACIÓN HIDROGEOQUÍMICA DEL SISTEMA DE FLUJO QUE DRENA LOS MACIZOS DE LA SIERRA DEL ROSARIO. CUBA
5. **Domech M. R. Gutiérrez;** 1998 LOS CAÑONES FLUVIOCARSICOS DE LA SIERRA DEL ROSARIO, CORDILLERA DE GUANIGUANICO; Instituto de Geología y Paleontología. Cuba.
6. **F. Javier Sánchez San Román** (Marzo 2008); DISTRIBUCIONES ESTADÍSTICAS; Dpto. Geología. Univ. Salamanca (España);
7. **F. Javier Sánchez San Román** (Mayo 2006); EVAPOTRANSPIRACION; Dpto. Geología. Univ. Salamanca (España);
8. **González P. J. C. y Martín Á. M.;** 1986 ESTUDIO GEÓLOGO-GEOFÍSICO DEL SISTEMA GEOTÉRMICO SAN DIEGO DE LOS BAÑOS; Centro Nacional de Termalismo "Víctor Santamarina". Cuba.



9. **Guillermo L. Franco Álvarez** (1994); LEXICO ESTRATIGRAFICO; Instituto de Geología y Paleontología. Cuba
10. **J.R. Fagundo, P. González, M. Suárez, J. Fagundo Sierra L. Sánchez, B. Peña, C. Meleán;** (2001) ORIGEN DE LA COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LAS AGUAS DEL SISTEMA HIDROTHERMAL SAN DIEGO DE LOS BAÑOS - LOS BERMEJALES; *Centro Nacional de Termalismo "Víctor Santamarina". Cuba.*
11. **Leslie F. y Molerio León;** (2006) EVALUACIÓN, APROVECHAMIENTO Y PROTECCIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN LA SIERRA DEL ROSARIO; Grupo de Aguas Terrestres, Instituto de Geofísica y Astronomía, Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente. Cuba.
12. **Moreno, A.M.; Peláez, R y Romero, J.;** 1994 MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL DEL YACIMIENTO DE AGUAS MINEROMEDICINALES SAN DIEGO DE LOS BAÑOS; Centro Nacional de Termalismo "Víctor Santamarina".Cuba.
13. **P. González, B. Peña, J. R. Fagundo, M. Suárez, C. Melián, F. R. Delgado;** 2000 AGUAS MINEROMEDICINALES EN EL OCCIDENTE DE CUBA; *Centro Nacional de Termalismo (CENTERVISA). Cuba.*
14. **Peláez, R., Olivares, M.C., et al.** (1990); INFORME PARA LA BUSQUEDA DETALLADA Y ORIENTATIVA DE LAS AGUAS MINERO MEDICINALES SAN DIEGO-BERMEJALES; Empresa Geológica de Pinar del Río. Cuba.
15. **Rivero N. D.; Moreira Carlos E. V.; Chapman Kelma Z. ;** (2000) ESTUDIO GEÓLOGO-GEOMORFOLÓGICO REGIONAL BÁSICO DE UN SECTOR DE LA PROVINCIA DE PINAR DEL RÍO (SIERRA DEL ROSARIO); Centro de Gestión de la Información y Desarrollo de la Energía, Cuba Energía y de Estudios Regionales de Occidente. Centro de Ingeniería y Consultoría de la Construcción. Cuba.
16. **Valtierra, José Guadalupe** (2003); HERRAMIENTA PARA LA CARACTERIZACIÓN GEOMORFOLÓGICA DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS; Centro Queretano de Recursos Naturales, Universidad Autónoma de Querétaro. México.



ANEXOS GRÁFICOS

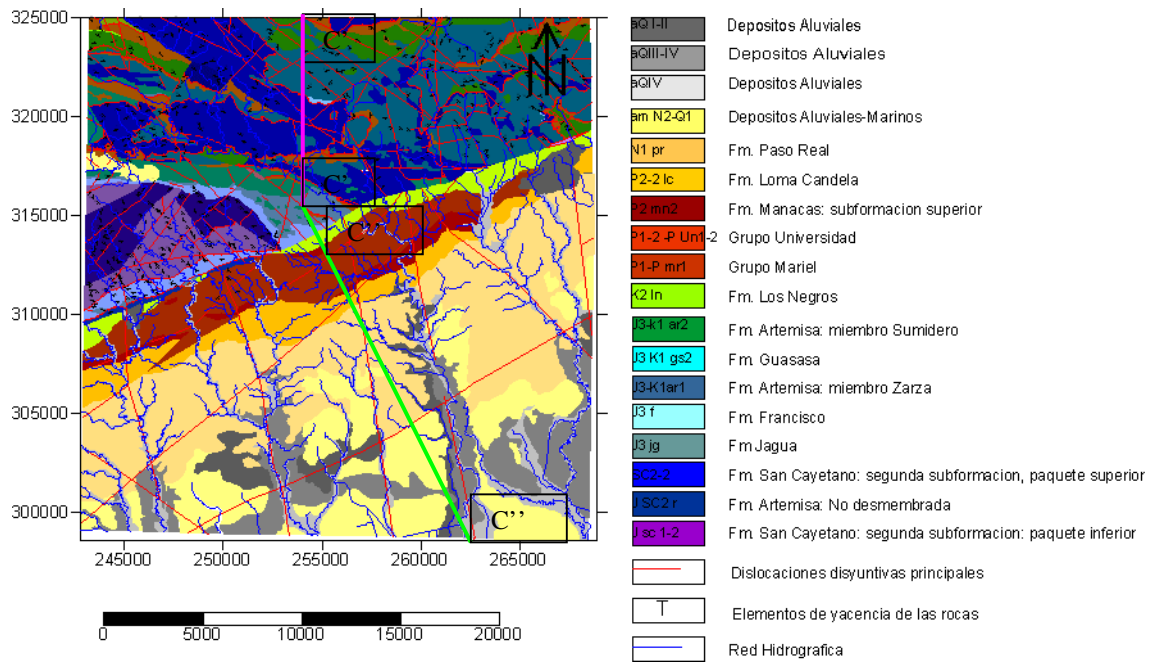


Figura 16: Mapa Geológico

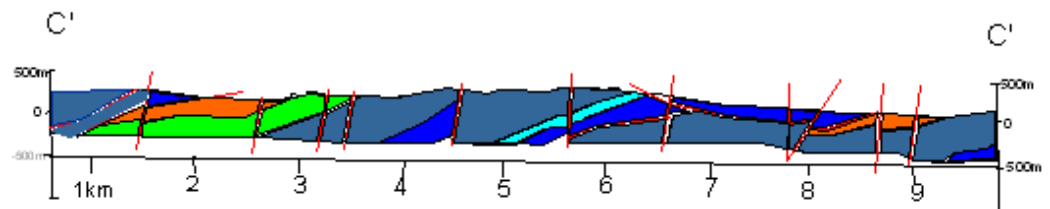


Figura 17: Perfil Estratigrafico C- C'

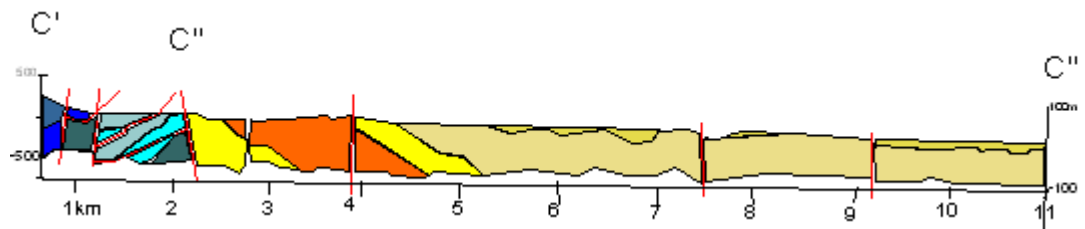










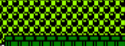


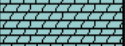


Figura 18: Perfil Estratigrafico C'- C''- C''

Comportamiento hidrológico de los flujos que drenan la cuenca de San Diego-Bermejales
Bruno Eddy Lima MADRE DEUS

Indice	Litología	Potencia	Descripcion
aQ_{IV}		5m	Depositos aluviales: arenas arcillosas, arcillas, limo con gravas cascajos de composicion silicea
aQ_{III-IV}		10m	Depositos aluviales: arenas arcillosas con gravas de cuarzo y fragmentos de composicion polimictica
aQ_{I-II}		10m	Depositos aluviales: Arcillas y arenas arcillosas de color pardo-carmelito, con gravas de cuarzo y concreciones ferruginosas
$amN_2 - Q_1$		100m	Depositos aluviales marinos: Conglomerados, gravelitas, areniscas poco consolidadas arcillosas, arcillas y arenas con gravas y guijaros de rocas siliceas
N_{1pr}		500m	Fm. Paso Real: calizas fragmentarias organogenas, arcillas carbonatadas, margas y calcarenitas.
$P_2^2 LC$		300m	Fm. Loma Candela: calizas fragmentarias y micritica organogenas, conglomerados calcareos y polimicticos, gravelitas, margas y arcillas carbonatadas.
$P_2 mn_2$		250m	Fm. Manacas: Subformacion superior: depositos de olistostroma, bloque de tamaño variable de rocas exóticas inmensas en una matriz areno-aleurolíticas vulcanomicticas
$P_2^1 - P_{ur_2}$		50m	Grupo Universidad: calizas organog., arcillas margosas, margas areno-aleurolíticas, a veces se observan intercalaciones finas de calcarenitas y aleurolitas carbonatadas.
$P_1 - P_{mr_2}$		1000m	Grupo Mariel: interestratificaciones de areniscas de granos finos a gruesos, gravelitas y conglomerados polimicticos a vulcanomicticos, aleurolitas y a veces calizas y margas
$K_2 ln$		500m	Fm. Los Negros: areniscas y aleurolitas polimicticas y vulcanomicticas con intercalaciones de gravelitas y conglomerados vulcanomicticos y polimicticos, calizas micriticas claras con rudistas
$J_3 - K_1 ar_2$		400m	Fm. Artemisa: miembro Sumidero: Calizas micriticas bien estratificadas con intercalaciones de pedernales
$J_3 - K_1 gs_2$		180m	Fm. Guasasa: calizas micriticas, estratificadas a veces margosas o dolomitizadas con intercalaciones delgadas de calizas mas oscuras o silicitas y aleurolitas
$J_3 - K_1 ar_1$		600m	Fm. Artemisa: miembro Zarza: calizas micriticas muy finamente estratificadas con intercalaciones de aleurolitas calcareas y areniscas cuarzosas de granos finos
$J_3 jg$		100m	Fm. Jagua: calizas estratificadas, argilitas y aleurolitas a veces con abundante material carbonoso y concreciones calcareas. Los depositos contienen una rica fauna fosil
$J_3 f$		100m	Fm. Francisco: Esquistos, calizas micriticas e intercalaciones delgadas de areniscas.
JSC_2^2		300m	Fm. San Cayetano: 2da subformacion, paquete superior: areniscas cuarzosas de granos medios a gruesos, en menor cantidad aleurolitas y conglomerados.
$J_1^2 SC$		300m	Fm. san Cayetano: 2da subformacion: paquete inferior: areniscas cuarzo feldespaticas de granos finos a medios, aleurolitas y aleuro areniscas.
$JSC_2 r$			Fm. San Cayetano: no desmembrada: areniscas cuarzosas de granos medios-gruesos menor cantidad conglomerados, areniscas cuarzo feldespaticas de grano fino a medio aleurolitas aleuroareniscas


 discordancia

Figura 19: Columna estratigráfica de la zona de estudio

Comportamiento hidrológico de los flujos que drenan la cuenca de San Diego-Bermejales
Bruno Eddy Lima MADRE DEUS

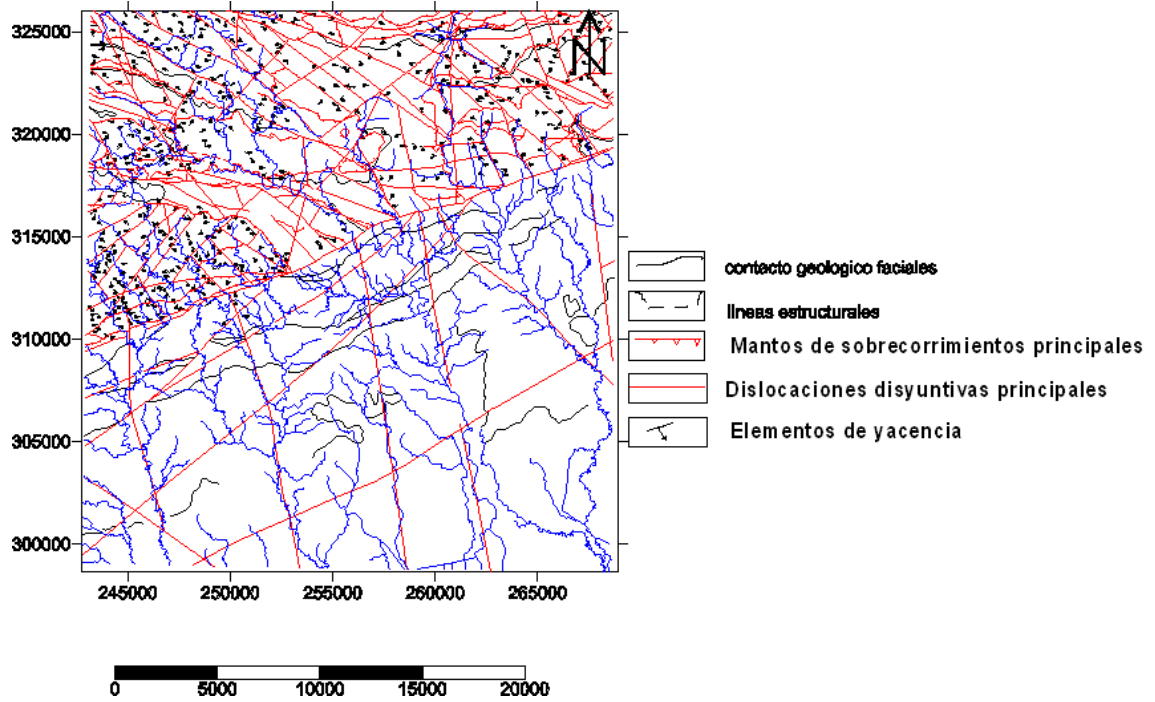


Figura 20: Mapa Tectónico y Estructural de la zona de estudio

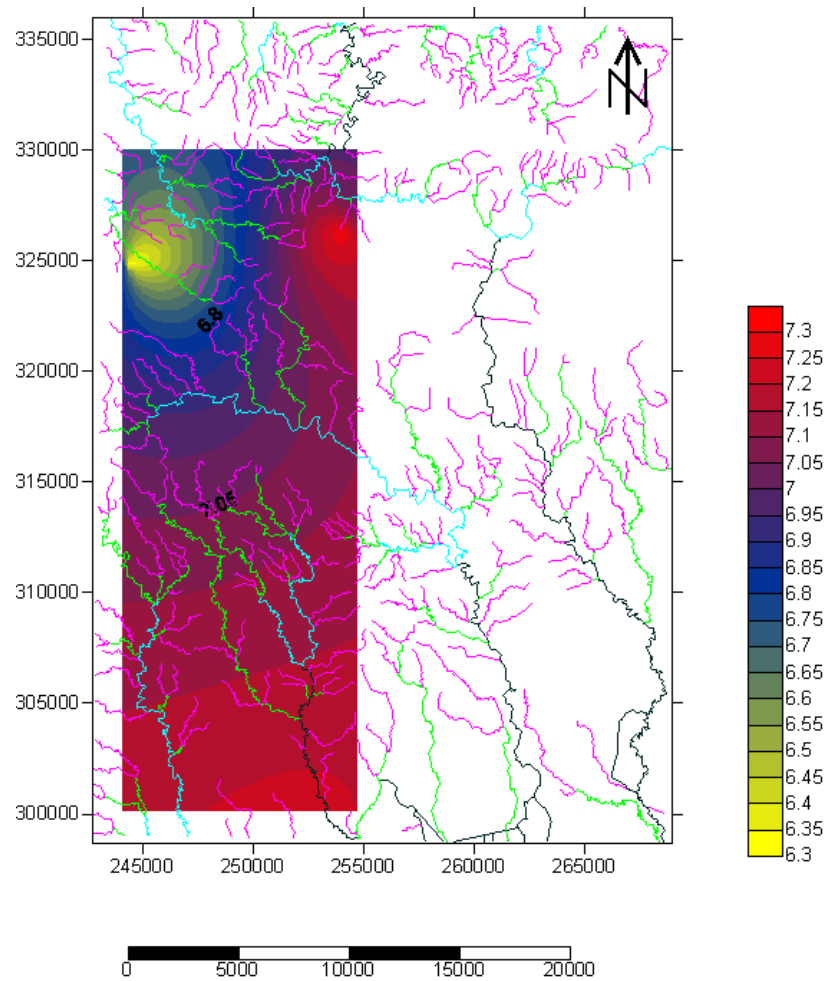


Figura 31: Mapa de variación del pH



Comportamiento hidrológico de los flujos que drenan la cuenca de San Diego-Bermejales
Bruno Eddy Lima MADRE DEUS

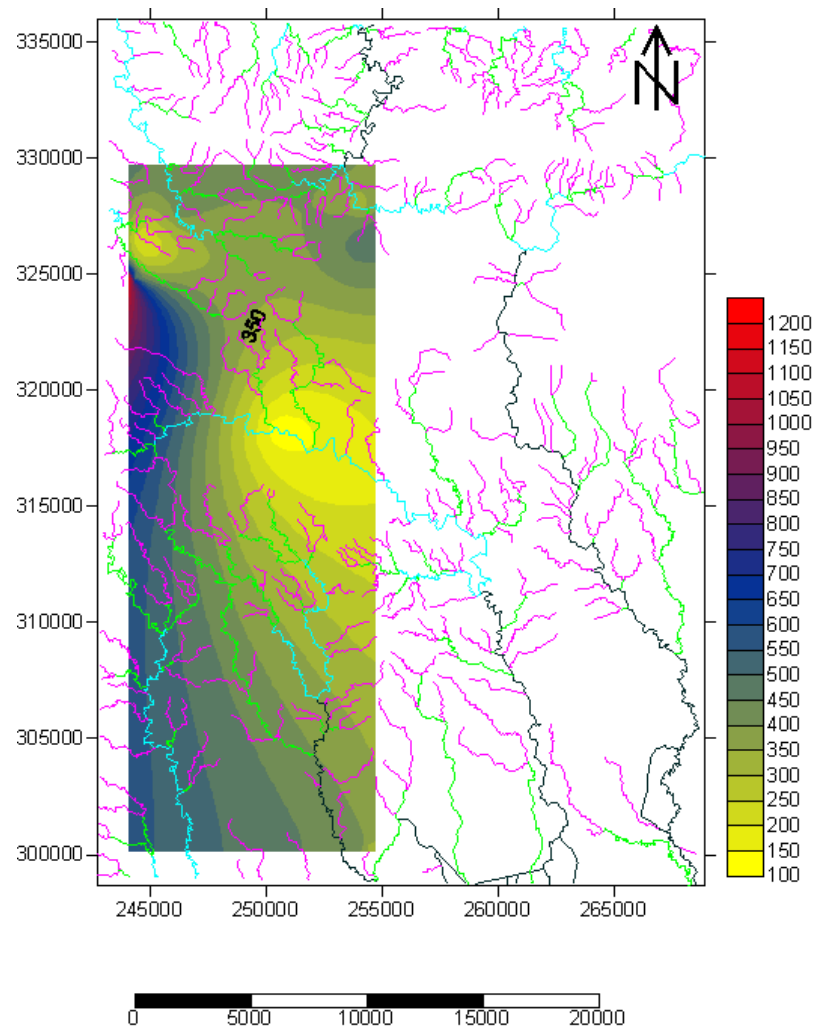


Figura 32: Mapa de Isoconductividad Eléctrica del agua superficial, (uS/cm)

Comportamiento hidrológico de los flujos que drenan la cuenca de San Diego-Bermejales
Bruno Eddy Lima MADRE DEUS

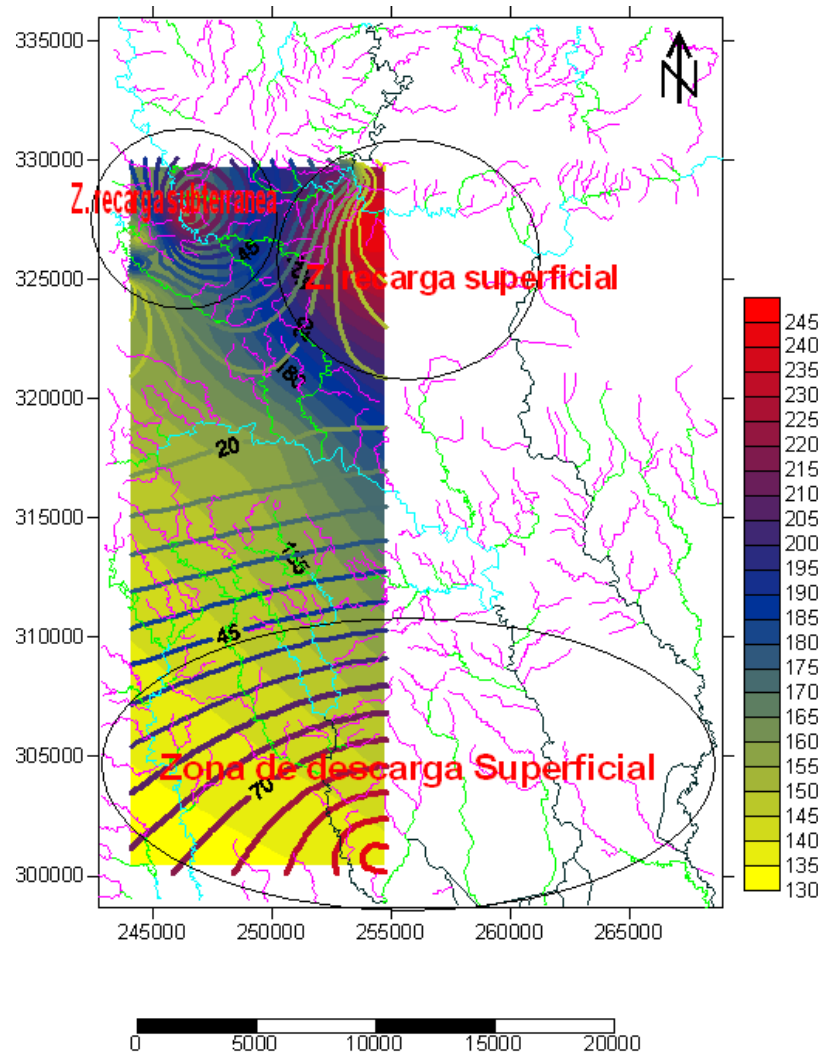


Figura 33: Mapa compuesto de caudal (isolinias), precipitación, red hidrográfica. Zonas de recarga y descargas.

El elemento Factor

Na^+	0.0435
K^+	0.0255
Ca^{2+}	0.0499
Mg^{2+}	0.0823
Cl^-	0.0282
SO_4^{2-}	0.0208
HCO_3^-	0.0164

Tabla12: coeficientes de conversión de Propiedades Químicas de las surgencias de aguas de la zona de Estudio



Tabla11: Propiedades Físicas de las surgencias valoradas de la zona de estudio

		Identificación de manantiales y arroyos	Caudal	Conductividad	lluvia	pH
X	Y					
244075	324800	Pozo P-55	0,09	1323,00	160,92	7,00
244375	324875	El Perdido	13,59	503,95	160,92	6,30
244225	325675	Los Puercos	53,48	333,33	160,92	
244525	326600	Punto 3(El coral)	2,90	206,29	160,92	
246250	327600	Tortuga	79,76	422,86	160,92	
		Pozo Mil Cumbre				
254750	327075	sulfuros	1,12	478,33	241,37	7,00
254000	326300	Casa de visita	2,50	478,52	241,37	7,30
253900	327800	Sagua(7b)	2,25	295,90	241,37	
253850	327750	Sagua(7a)	2,25	379,00	241,37	
		Manantial Casa				
254425	327050	Guardabosque	1,00			7,10
253250	329650	Las Vueltas(10)	34,10	419,52	209,90	
253500	329975	San Marco	0,54			6,99
254175	300075	Ancon	85,29	386,38		7,24
254200	300425	San Marco(punto13)	93,57	413,76	136,31	
254375	300250	Canilla	91,43	327,90		7,20
		Rio San Diego				
250450	318300	Bermejales	19,56	120,00	160,87	7,00

Tabla 8: Concentraciones de elementos químicos mayoritarios de la región expresada en mg/L

SC: subcuenca

Nombre	Na ⁺ +K ⁺	Ca	Mg	Cl	HCO ₃	SO ₄
SC 1	154	429	52	32	276	1299
SC 2	84	518	54	86	327	1260
SC 3	103	518	51	54	327	1332
SC 4	72	513	57	37	314	1313

Tabla 9: Concentraciones de elementos químicos mayoritarios de la región expresada en meq/L

Nombre	Na ⁺ +K ⁺	Ca	Mg	Cl	HCO ₃	SO ₄
SC 1	10.62	21.4	4.27	0.90	4.52	27.01
SC 2	5.79	25.84	4.44	2.42	5.36	26.2
SC 3	7.1	25.84	4.19	1.52	5.36	27.7
SC 4	4.96	25.59	4.69	1.04	5.14	27.31



Comportamiento hidrológico de los flujos que drenan la cuenca de San Diego-Bermejales
Bruno Eddy Lima MADRE DEUS

Tabla10: Balance hídrico diario Octubre-Diciembre 2004

Día	Precipitación (mm)	Caudal (l/s)	Temperatura	ETP (mm)	Déficit escorrentía(mm)
1-oct-04	47,75	0,80	23,00	19,50	28,25
2-oct-04	49,19	0,89	23,00	19,50	29,69
3-oct-04	49,66	0,92	23,00	19,50	30,16
4-oct-04	41,60	0,66	23,00	19,50	22,10
5-oct-04	38,83	0,54	23,00	19,50	19,33
6-oct-04	35,05	0,44	23,00	19,50	15,55
7-oct-04	33,40	0,41	23,00	19,50	13,90
8-oct-04	31,85	0,38	23,00	19,50	12,35
9-oct-04	32,60	0,38	23,00	19,50	13,10
10-oct-04	33,31	0,44	23,00	19,50	13,81
11-oct-04	45,88	0,71	23,00	19,50	26,38
12-oct-04	40,85	0,59	23,00	19,50	21,35
13-oct-04	42,81	0,66	23,00	19,50	23,31
14-oct-04	42,55	0,65	23,00	19,50	23,05
15-oct-04	49,97	2,33	23,00	19,50	30,47
16-oct-04	98,15	5,04	23,00	19,50	78,65
17-oct-04	92,67	3,55	23,00	19,50	73,17
18-oct-04	71,57	2,15	23,00	19,50	52,07
19-oct-04	55,88	1,17	23,00	19,50	36,38
20-oct-04	51,20	0,95	23,00	19,50	31,70
21-oct-04	49,15	0,84	23,00	19,50	29,65
22-oct-04	46,75	0,76	23,00	19,50	27,25
23-oct-04	44,40	0,69	23,00	19,50	24,90
24-oct-04	40,65	0,58	23,00	19,50	21,15
25-oct-04	37,25	0,50	23,00	19,50	17,75
26-oct-04	35,75	0,46	23,00	19,50	16,25
27-oct-04	32,70	0,39	23,00	19,50	13,20
28-oct-04	32,25	0,32	23,00	19,50	12,75
29-oct-04	31,80	0,31	23,00	19,50	12,30
30-oct-04	32,35	0,37	23,00	19,50	12,85
31-oct-04	29,36	0,32	23,00	19,50	9,86
1-nov-04	28,45	0,29	21,00	16,92	11,53
2-nov-04	28,70	0,29	21,00	16,92	11,78
3-nov-04	27,90	0,27	21,00	16,92	10,98
4-nov-04	26,20	0,24	21,00	16,92	9,28
5-nov-04	28,47	0,29	21,00	16,92	11,54
6-nov-04	29,05	0,31	21,00	16,92	12,13
7-nov-04	26,75	0,26	21,00	16,92	9,83
8-nov-04	25,55	0,23	21,00	16,92	8,63
9-nov-04	27,00	0,26	21,00	16,92	10,08
10-nov-04	24,50	0,21	21,00	16,92	7,58
11-nov-04	21,75	0,16	21,00	16,92	4,83
12-nov-04	21,90	0,16	21,00	16,92	4,98
13-nov-04	20,20	0,14	21,00	16,92	3,28
14-nov-04	19,00	0,12	21,00	16,92	2,08
15-nov-04	20,40	0,14	21,00	16,92	3,48
16-nov-04	20,35	0,15	21,00	16,92	3,43
17-nov-04	18,95	0,12	21,00	16,92	2,03
18-nov-04	17,65	0,10	21,00	16,92	0,73
19-nov-04	16,95	0,10	21,00	16,92	0,03
20-nov-04	16,45	0,09	21,00	16,92	-0,47



Comportamiento hidrológico de los flujos que drenan la cuenca de San Diego-Bermejales
Bruno Eddy Lima MADRE DEUS

21-nov-04	16,10	0,09	21,00	16,92	-0,82
22-nov-04	15,45	0,08	21,00	16,92	-1,47
23-nov-04	15,00	0,07	21,00	16,92	-1,92
24-nov-04	15,50	0,08	21,00	16,92	-1,42
25-nov-04	15,25	0,08	21,00	16,92	-1,67
26-nov-04	14,30	0,07	21,00	16,92	-2,62
27-nov-04	20,50	0,06	21,00	16,92	3,58
28-nov-04	14,40	0,07	21,00	16,92	-2,52
29-nov-04	14,10	0,13	21,00	16,92	-2,82
30-nov-04	14,05	0,09	21,00	16,92	-2,87
1-dic-04	12,70	0,06	19,00	14,90	-2,20
2-dic-04	13,35	0,10	19,00	14,90	-1,55
3-dic-04	13,30	0,07	19,00	14,90	-1,60
4-dic-04	11,70	0,06	19,00	14,90	-3,20
5-dic-04	11,05	0,05	19,00	14,90	-3,85
6-dic-04	10,40	0,05	19,00	14,90	-4,50
7-dic-04	9,15	0,14	19,00	14,90	-5,75
8-dic-04	7,83	0,03	19,00	14,90	-7,06
9-dic-04	7,75	0,08	19,00	14,90	-7,15
10-dic-04	7,05	0,15	19,00	14,90	-7,85
11-dic-04	6,05	0,02	19,00	14,90	-8,85
12-dic-04	4,70	0,01	19,00	14,90	-10,20
13-dic-04	4,35	0,01	19,00	14,90	-10,55
14-dic-04	4,70	0,01	19,00	14,90	-10,20
15-dic-04	5,55	0,02	19,00	14,90	-9,35
16-dic-04	5,05	0,02	19,00	14,90	-9,85
17-dic-04	4,55	0,02	19,00	14,90	-10,35
18-dic-04	4,40	0,01	19,00	14,90	-10,50
19-dic-04	21,15	0,22	19,00	14,90	6,26
20-dic-04	13,00	0,06	19,00	14,90	-1,90
21-dic-04	9,95	0,05	19,00	14,90	-4,95
22-dic-04	9,00	0,03	19,00	14,90	-5,90
23-dic-04	8,55	0,04	19,00	14,90	-6,35
24-dic-04	7,85	0,05	19,00	14,90	-7,05
25-dic-04	7,40	0,03	19,00	14,90	-7,50
26-dic-04	5,75	0,02	19,00	14,90	-9,15
27-dic-04	4,94	0,02	19,00	14,90	-9,96
28-dic-04	5,63	0,03	19,00	14,90	-9,26
29-dic-04	5,85	0,03	19,00	14,90	-9,05
30-dic-04	5,45	0,02	19,00	14,90	-9,45
31-dic-04	5,15	0,02	19,00	14,90	-9,75
Total	2271,28	35,46	-	1574	697,28

Tabla 5: Balance Hídrico mensual 2001-2006 de la cuenca San Diego

Tiempo	Precipitación(mm)	Caudal (l/s)	Temperatura	ETP (mm/mes)	Déficit escorrentía(mm)
ene-01	61,3	1,46	21,8	71,45	-10,15
feb-01	69,475	1,97	21,6	71,36	-1,89
mar-01	20,175	0,14	22,4	85,50	-65,33
abr-01	73,475	2,25	23,5	99,85	-26,38
may-01	210,825	23,38	25,5	135,95	74,88
jun-01	214,2	24,19	26,7	152,62	61,58
jul-01	183,95	17,46	26,4	151,48	32,47



Comportamiento hidrológico de los flujos que drenan la cuenca de San Diego-Bermejales
Bruno Eddy Lima MADRE DEUS

ago-01	226,15	27,14	26,9	155,10	71,05
sep-01	525,725	157,29	26,6	139,62	386,11
oct-01	348,2	67,16	23	90,02	258,18
nov-01	49,025	0,86	21	64,05	-15,03
dic-01	109,25	5,57	19	48,18	61,07
ene-02	52,95	1,03	21,8	71,45	-18,50
feb-02	97,5	4,31	21,6	71,36	26,14
mar-02	76,775	2,49	22,4	85,50	-8,72
abr-02	34,425	0,37	23,5	99,85	-65,43
may-02	386,2	83,27	25,5	135,95	250,25
jun-02	289,375	45,64	26,7	152,62	136,76
jul-02	326,9	58,89	26,4	151,48	175,42
ago-02	232,675	28,83	26,9	155,10	77,58
sep-02	414,5	96,40	26,6	139,62	274,88
oct-02	260,7	36,66	23	90,02	170,68
nov-02	119,425	6,80	21	64,05	55,38
dic-02	88,5	3,46	19	48,18	40,32
ene-03	24,675	0,19	21,8	71,45	-46,78
feb-03	95,075	4,07	21,6	71,36	23,72
mar-03	94,075	3,97	22,4	85,50	8,57
abr-03	162,025	13,28	23,5	99,85	62,18
may-03	152,45	11,63	25,5	135,95	16,50
jun-03	248,775	33,21	26,7	152,62	96,16
jul-03	162,75	13,41	26,4	151,48	11,27
ago-03	265,8	38,18	26,9	155,10	110,70
sep-03	200,2	20,94	26,6	139,62	60,58
oct-03	5,775	0,16	23	90,02	-84,25
nov-03	130,525	8,28	21	64,05	66,48
dic-03	72	2,14	19	48,18	23,82
ene-04	61,55	1,48	21,8	71,45	-9,90
feb-04	117,45	6,55	21,6	71,36	46,09
mar-04	40,225	0,53	22,4	85,50	-45,28
abr-04	33,8	0,35	23,5	99,85	-66,05
may-04	41,3	0,57	25,5	135,95	-94,65
jun-04	68,45	1,90	26,7	152,62	-84,17
jul-04	200,525	21,01	26,4	151,48	49,05
ago-04	270,05	39,48	26,9	155,10	114,95
sep-04	299,175	48,94	26,6	139,62	159,56
oct-04	92,225	3,80	23	90,02	2,21
nov-04	18,675	0,13	21	64,05	-45,38
dic-04	39,475	0,51	19	48,18	-8,71
ene-05	40,675	0,55	21,8	71,45	-30,78
feb-05	18,975	0,13	21,6	71,36	-52,39
mar-05	121,975	7,12	22,4	85,50	36,48
abr-05	37,425	0,45	23,5	99,85	-62,43
may-05	75,4	2,39	25,5	135,95	-60,55
jun-05	552,8	174,35	26,7	152,62	400,18
jul-05	238,975	30,51	26,4	151,48	87,50
ago-05	483,1	132,20	26,9	155,10	328,00
sep-05	414,2	96,25	26,6	139,62	274,58
oct-05	350,7	68,17	23	90,02	260,68
nov-05	52,85	1,03	21	64,05	-11,20
dic-05	55,75	1,17	19	48,18	7,57
ene-06	33,55	0,35	21,8	71,45	-37,90



Comportamiento hidrológico de los flujos que drenan la cuenca de San Diego-Bermejales
Bruno Eddy Lima MADRE DEUS

feb-06	72,85	2,20	21,6	71,36	1,49
mar-06	9,05	0,13	22,4	85,50	-76,45
abr-06	34,075	0,36	23,5	99,85	-65,78
may-06	231,575	28,54	25,5	135,95	95,63
jun-06	434,4	106,20	26,7	152,62	281,78
jul-06	191,025	18,94	26,4	151,48	39,55
ago-06	211,65	23,58	26,9	155,10	56,55
sep-06	238,525	30,39	26,6	139,62	98,91
Total	11268,22	1696,73	-	7388,83	3879,395

Tabla 6: Balance Hídrico Superficial ideal anual de la Cuenca San Diego

Tiempo(mes)	Precipitación(mm)	Caudal(l/s)	Temperatura(°C)	ETP (mm/mes)	Déficit escorrentía(mm)
Enero	45,78	0,73	21,80	71,45	-25,67
Febrero	78,55	2,62	21,60	71,36	7,19
Marzo	60,38	1,41	22,40	85,50	-25,12
Abril	62,54	1,54	23,50	99,85	-37,31
Mayo	182,96	17,26	25,50	135,95	47,01
Junio	301,33	49,68	26,70	152,62	148,71
Julio	214,72	24,31	26,40	151,48	63,24
Agosto	291,56	46,37	26,90	155,10	136,46
septiembre	334,88	61,93	26,60	139,62	195,26
Octubre	217,13	24,90	23,00	90,02	127,11
noviembre	68,33	1,89	21,00	64,05	4,28
diciembre	72,30	2,16	19,00	48,18	24,12
Total	1930,46	234,80	-	1265,18	665,28



Comportamiento hidrológico de los flujos que drenan la cuenca de San Diego-Bermejales
Bruno Eddy Lima MADRE DEUS

OPINIÓN DEL TUTOR.



Comportamiento hidrológico de los flujos que drenan la cuenca de San Diego-Bermejales
Bruno Eddy Lima MADRE DEUS

