

Romero Méndez, A. y Montes Galbán, E. (2009): "Evaluación espacio – temporal de la sedimentación en el embalse Burro Negro, estado Zulia / Venezuela mediante el uso combinado de SIG – Ecosonda – DGPS", *GeoFocus (Artículos)*, n° 9, p. 209-231. ISSN: 1578-5157

EVALUACIÓN ESPACIO – TEMPORAL DE LA SEDIMENTACIÓN EN EL EMBALSE BURRO NEGRO, ESTADO ZULIA/VENEZUELA MEDIANTE EL USO COMBINADO DE SIG – ECOSONDA – DGPS

ADELMO ROMERO MÉNDEZ¹ y ELOY MONTES GALBÁN²

Universidad del Zulia. Centro de Estudios Geográficos
Núcleo Humanístico Bloque P3. Maracaibo, Venezuela

¹adelmor812@gmail.com ²eloyead@yahoo.com

RESUMEN

El presente estudio tiene como objeto evaluar la sedimentación y evolución espacial del fondo del embalse Burro Negro para los años 1956 – 2002 y las consecuencias vinculadas con la capacidad de almacenamiento del agua utilizable. Se aplicaron métodos de levantamiento de datos por digitalización de curvas de nivel y batimetría con ecosonda – DGPS en campo; posteriormente se procesaron los datos con SIG para generar los MDE y trazar perfiles y curvas de área, capacidad y elevación. Los resultados muestran la colmatación y aterramiento de áreas en las zonas de entrada de los ríos al embalse. Adicionalmente el volumen de sedimentos en el fondo para el 2002 ha ocupado un 8,57% del volumen o capacidad de almacenar agua.

Palabras clave: embalse, sedimentación, batimetría, SIG, ecosonda - DGPS.

TIME-SPACE ASSESSMENT OF THE SEDIMENTATION IN THE BURRO NEGRO DAM (ZULIA STATE/VENEZUELA) BY MEANS OF THE INTEGRATED USE OF GIS, DGPS AND ECOSOUNDING

ABSTRACT

The present study objective is to evaluate the sedimentation and space evolution of the Burro Negro dam's bottom from 1956 to 2002, and the direct consequences related to its water storage capacity. Data gathering through digitalization of level curves and on field bathymetry with ecosounding – DGPS methods were applied. Data was then processed with GIS to generate the Elevation Digital Models and to plot profiles and curves of area, capacity and elevation. The results show the filling to the brim of the dam and the sedimentation of areas in the rivers entry zone to the dam. Additionally, the volume of sediments on the bottom by 2002 has occupied 8,57 % of the water storage capacity.

Key words: dam, sedimentation, bathymetry, GIS, ecosounding-DGPS.

1. Introducción

Los crecientes problemas de suministro de agua: oportuno, suficiente y de calidad para los diversos usos y especialmente para el consumo humano, son una constante en numerosos países, regiones y sociedades del mundo contemporáneo. El estudio de las soluciones prospectivas es una apremiante necesidad para administrar eficientemente este vital recurso difícilmente renovable.

Los efectos de la sedimentación en los cuerpos de agua están definidos y estudiados ampliamente. (Bondurant and Liversey, 1973; Cybersky, 1973; Dendy *et al.*, 1973; Matyas and Rothenburg, 1986 - citados por Odhiambo y Boss, 2004). Las consecuencias de esta problemática se expresan en las tasas de sedimentación, colmatación y contaminación (por la turbidez del agua) de los embalses.

A estos efectos y consecuencias antes mencionados se suman los problemas por los errores contenidos en los planos topográficos originales de los embalses; estos planos topográficos originales son fuente de errores porque no reflejan apropiadamente las estimaciones reales de la capacidad y de las áreas a ser inundadas a posteriori (Furban y Austin, 2008). En muchos casos no existe esa información básica y no han sido evaluados desde su construcción o no existe un monitoreo secuenciado de ello. Las estimaciones de capacidad de almacenaje y de volumen son a menudo sobreestimadas por efectos de imprecisiones y técnicas de cálculos ya superadas.

En Venezuela y específicamente en la costa oriental del lago de Maracaibo, del estado Zulia, este problema de abastecimiento de agua potable es de pronóstico reservado por la limitada dotación natural de fuentes de aguas dulces superficiales y subterráneas, por efectos de la creciente erosión de los suelos en las cuencas hidrográficas altas y medias, con limitadas capacidades de uso como unidades productoras de agua, cercanas a las comunidades y a la infraestructura de la industria petrolera. Estos problemas de abastecimiento son objeto de protestas y noticias frecuentes.

La cuenca alta y media del río Pueblo Viejo, formada por la confluencia del río Grande (al sur del embalse) y del río Chiquito (al norte del embalse), constituyen esta unidad productora de agua dulce, que se almacena en el embalse ubicado en el sector denominado "Burro Negro". Esta cuenca está localizada al extremo este del municipio Lagunillas, en la costa oriental del lago de Maracaibo, del estado Zulia, Venezuela. Ocupa una superficie o área de drenaje de 747 Km² aproximadamente (véase [figura 1](#)).

Los problemas generales de erosión en las cuencas hidrográficas se ven acelerados por las acciones antrópicas y sus dañinos efectos en la sedimentación de los embalses: disminución de la capacidad de almacenaje de agua y en consecuencia la disminución del volumen útil o aprovechable, colmatación del volumen muerto, pérdida de capacidad de regulación hidráulica y amortiguación de crecientes o avenidas para proteger la infraestructura de la industria petrolera localizada aguas abajo del embalse, taponamiento de las obras de toma, salidas de fondo y disminución de las áreas aptas para recargar los acuíferos de la zona. Por otro lado la alta turbidez del agua cruda, contamina, enturbia, reduce la producción de agua potable en la planta de tratamiento, reduce la fotosíntesis, el oxígeno disuelto y degrada los ecosistemas acuáticos. El análisis de las tendencias en cuanto a la cantidad, la calidad del agua y su evolución físico-química

Romero Méndez, A. y Montes Galbán, E. (2009): "Evaluación espacio – temporal de la sedimentación en el embalse Burro Negro, estado Zulia / Venezuela mediante el uso combinado de SIG – Ecosonda – DGPS", *GeoFocus (Artículos)*, n° 9, p. 209-231. ISSN: 1578-5157

posibilita prever la calidad futura de las reservas de aguas blancas superficiales (Kikkawa, 1980; Pemberton, 1980 - citados por Odhiambo y Boss, 2004). Ello ocurre no solamente en los embalses, sino también aguas arriba y abajo de los mismos.

Para el presente caso de estudio se aporta un conocimiento científico importante, válido y confiable. Contribuye a soportar la toma de decisiones pendientes a ser aplicadas a esta problemática local, planteada desde la óptica de la ciencia geográfica, mediante la aplicación combinada de las Tecnologías de la Información Geográfica (TIG).

Aplicaciones combinadas de las TIG (SIG-DGPS-MDE), para realizar levantamientos batimétricos, pueden obtener significativas reducciones de costos, tiempos, equipos, personal y lo más importante: nuevos conocimientos geográficos de utilidad para solucionar problemas generados por sedimentación en embalses. Además son de adecuada precisión y generan abundante cartografía digital. Constituyen un aporte de la Geografía Aplicada. Asunto o tema de pertinencia profesional de los geógrafos de hoy. "...los objetos que interesan a la geografía no son solo objetos y acciones móviles, sino también inmóviles, tales como una ciudad, un embalse, una carretera, un puerto, una selva, una plantación, un lago, una montaña" (Santos, 2000, p. 62).

Es el propósito de este estudio evaluar, comparar la sedimentación y colmatación de áreas en el embalse; obtener conocimientos actualizados y resultados dirigidos a proveer información básica que permita soportar la toma de decisiones técnicas y administrativas, planificar, facilitar información útil para diseñar posibles mecanismos o soluciones tecnológicas idóneas para la extracción de sedimentos que contribuyan a resolverla o mitigarla. Las próximas generaciones de las comunidades mal atendidas y la industria petrolera tendrán agudizados estos problemas y riesgos si no se implementan las soluciones desde ahora. Obligatoriamente se tendrá que seguir utilizando, para siempre, esta valiosa y escasa fuente de agua dulce deficitaria. Los estudios batimétricos y sedimentológicos proporcionan valiosa información para monitorear los flujos de sedimentos, determinar las tasas de acumulación y predecir el tiempo de vida útil de los embalses (Odhiambo y Boss, 2004).

Partiendo de lo anteriormente expuesto el objetivo de la presente investigación consiste en la evaluación espacio-temporal de la sedimentación y la evolución del fondo del embalse Burro Negro y las consecuencias de la sedimentación para el periodo comprendido entre los años 1956 al 2002.

2. Materiales y métodos

Las metodologías clásicas desarrolladas: uso del antiguo sextante y escandallo para posicionar y medir profundidades, eran imprecisas y muy lentas sus aplicaciones, igualmente los métodos topográficos tradicionales mediante distanciadas secciones longitudinales y transversales del área del futuro embalse. El método del posicionamiento topográfico radial también quedó superado; este último desarrolla un despliegue radial de líneas consecutivas (X e Y) de sondeo (Z) con abundantes datos medidos alrededor de los puntos de partida u origen; son de alto costo en uso de equipos, personal, tiempo y de resultados limitados. Este método genera problemas de

Romero Méndez, A. y Montes Galbán, E. (2009): "Evaluación espacio – temporal de la sedimentación en el embalse Burro Negro, estado Zulia / Venezuela mediante el uso combinado de SIG – Ecosonda – DGPS", *GeoFocus (Artículos)*, n° 9, p. 209-231. ISSN: 1578-5157

concentración de muchos datos muy cercanos al origen o entorno inmediato y una alta dispersión y mucho menos datos en las vecindades extendidas o lejanas al origen. Esto impide una buena selección espacial y regular de los datos más representativos del fondo del embalse que serán procesados para la obtención de los resultados de la batimetría.

La suma de experiencias y tecnologías, al pasar del tiempo, en lo referente a las evaluaciones volumétricas de los reservorios de agua, han permitido el avance en las aplicaciones de nuevas tecnologías: equipos, instrumentos, procedimientos, métodos y software utilizados, en muchos casos con el objeto de estimar la acumulación de sedimentos y determinar la capacidad de almacenamiento de los embalses; recientemente se ha implementado la tecnología del Sistema de Posicionamiento Global Diferencial (DGPS), conjuntamente con receptores acústicos de profundidad o ecosondas y Sistemas de Información Geográfica (SIG) para el levantamiento y procesamiento de datos (Furnans y Austin, 2008).

Estas metodologías logran más precisión, rapidez y realismo en la representación del fondo de los embalses, al igual que el uso de innovadoras ecosondas de doble frecuencia y de barrido por multihaz; contrario a los métodos y técnicas clásicos utilizados. Todo integrado en la línea del uso y aplicación de las TIG y con la suma de algunas particularidades metodológicas, se realizó el levantamiento y procesamiento digital de las bases de datos de los años 1956 y 2002 en el presente estudio. Ello nos permitió significativos ahorros de tiempo y recursos, además se logró mayor precisión en las determinaciones de los parámetros espaciales y morfométricos del embalse.

2.1. Fuentes de datos y materiales utilizados

Entre las fuentes de datos utilizadas están los Ortofotomapas a escala 1: 25.000, año 1998, procedentes del Instituto Geográfico de Venezuela Simón Bolívar (IGVSB); se trabajó con las hojas correspondientes al embalse y áreas adyacentes. También se utilizó la información proporcionada por el proyecto de construcción de las obras civiles de la presa y los planos topográficos del año 1956, que cubren el área del embalse, todo ello procedente del antiguo Ministerio de Obras Públicas; adicional a esto se complementó la bibliografía con la revisión de estudios elaborados sobre la cuenca en años anteriores por instituciones como el Ministerio del Ambiente.

Entre las herramientas tecnológicas empleadas se encuentran: Sistemas de Información Geográfica (Software: Arc/Info 3.1, Golden Surfer 8, Idrisi - 32), una ecosonda analógica marca Raytheon de 208 Khz. de alta frecuencia y Transducer de alta frecuencia, acoplados a un DGPS (Sistema de Posicionamiento Global Diferencial) marca Trimble, Telémetro Láser marca Bushnel Yardage Pro 1000, (para medir distancias precisas en puntos donde no es posible llegar y asignar coordenadas con el Geoexplorador Trimble IIIc), por otro lado se realizaron cálculos con el paquete Excel 2003.

Romero Méndez, A. y Montes Galbán, E. (2009): "Evaluación espacio – temporal de la sedimentación en el embalse Burro Negro, estado Zulia / Venezuela mediante el uso combinado de SIG – Ecosonda – DGPS", *GeoFocus (Artículos)*, n° 9, p. 209-231. ISSN: 1578-5157

2.2. Construcción de la base de datos espacial

Se realizó el procesamiento de dos bases de datos: la primera de ellas referida a los datos topográficos del área del vaso del embalse medidos para el año 1956, la segunda corresponde a los datos de la batimetría del embalse levantada para el año 2002; luego se efectuaron los procesos de análisis espacial pertinentes.

Para lograr los objetivos de esta etapa se procedió a digitalizar manualmente, a través del uso del SIG Arc/Info. 3.1 y de una tableta digitalizadora, el plano analógico topográfico (a escala 1:5.000 levantado en el año 1956) con curvas de nivel a intervalos de 2 m y coordenadas locales arbitrarias, sin referencia o enlace al sistema de coordenadas de la red de geodesia nacional, por lo cual se hizo necesario proceder a una georeferenciación (coordenadas UTM) con una serie de puntos de control en campo.

En el caso de la situación para el año 2002 se realizó un levantamiento batimétrico que "consiste en la obtención de las coordenadas y profundidades (x, y, z) de un número suficiente de puntos dentro del vaso del embalse, de forma que mediante el posterior tratamiento de esos datos, con programas informáticos adecuados se puedan obtener, de la manera más real posible, las curvas de nivel que definen el fondo situado bajo la lámina de agua" (CEEOP, 2007, p. S/P). En este caso se empleó una ecosonda analógica de alta frecuencia, acoplados a un DGPS, el cual mide y registra coordenadas corregidas en tiempo real al recibir las señales de los satélites de posicionamiento y del satélite "Landstar Racal" con precisión submétrica; ello ahorra el cálculo de corrección diferencial posterior.

En estas mediciones, observaciones y registros de campo, se utilizó un bote pequeño a motor, al mismo se le instaló, en un costado, el sensor del ecosonda siguiendo para ello las normativas establecidas que buscan tener el mínimo efecto de las vibraciones, cabeceo, balanceo del bote y de contacto con espuma o burbujas. Cada día de recolección de datos de campo, el receptor ecosonda se calibró (a partir de la lectura de la regla graduada o hidrómetro acotado y adosada a la torre toma). Se tomaban dos lecturas sobre la regla, una al inicio y otra al finalizar la jornada de trabajo, todo ello con el objeto de garantizar la calidad y precisión de los datos levantados.

Los datos obtenidos permitieron generar un nuevo plano acotado con la gráfica de la trayectoria seguida por el bote en el espejo de agua al momento del levantamiento (véase [figura 2](#)). De la recolección de datos se pudo generar una tabla con la selección de 4011 registros que contienen los datos X e Y (coordenadas) y la Z (profundidad), ésta fue derivada a partir de la lectura de la gráfica generada por la ecosonda, para ello se tomó en cuenta el punto medio, en el ancho o grosor del trazo graficado (indicador de la presencia de material fino suspendido en el fondo del agua). También se observaron y consideraron los registros que presentaron cambios significativos en las pendientes del perfil sobre la gráfica, de esta manera se obtuvo la profundidad de cada punto más representativo seleccionado y luego derivar las cotas de fondo respectivas.

Romero Méndez, A. y Montes Galbán, E. (2009): "Evaluación espacio – temporal de la sedimentación en el embalse Burro Negro, estado Zulia / Venezuela mediante el uso combinado de SIG – Ecosonda – DGPS", *GeoFocus (Artículos)*, n° 9, p. 209-231. ISSN: 1578-5157

2.3. Procesamiento de los datos

Se iniciaron los procedimientos analíticos con SIG, utilizando para los análisis geoestadísticos el programa Surfer 8; se inició con el proceso de interpolación de las curvas de nivel (1956) y de los puntos levantados con la ecosonda, seleccionando el método de interpolación Kriging ordinario, como indica Moral (2004), es uno de los más utilizados por sus características, este método asume la hipótesis intrínseca, es decir, la estacionariedad en la media y la varianza (Sánchez, 2002), su ecuación es como sigue:

$$Z(s) = \mu(s) + \varepsilon(s)$$

siendo: $Z(s)$ la variable de interés, $\mu(s)$ una constante (media) desconocida, $\varepsilon(s)$ los errores aleatorios, s indica un lugar determinado (coordenadas espaciales X longitud e Y latitud).

Se generaron las capas de superficie continua: la primera el modelo digital del terreno (MDT) correspondiente al año 1956, la segunda el modelo digital de fondo (MDF) para el 2002. Luego se exportó/importó la data al software Idrisi – 32. En el mismo se realizó una clasificación de los modelos con el fin de crear las isóneas que permitieron calcular las tablas y gráficos de área, capacidad, volúmenes originales y actuales del embalse. Estos últimos cálculos fueron realizados con la ayuda de un paquete de cálculo (Excel 2003). Por otro lado fueron seleccionadas las áreas más representativas, que se corresponden con el eje longitudinal antiguo de los ríos, para trazar perfiles en ambos modelos y compararlos y analizarlos posteriormente.

En el caso de los datos de profundidades se derivaron dos modelos batimétricos a partir de los datos del nivel de las aguas, de la cota del terreno y la cota de fondo, a través de la aplicación de una sencilla fórmula matemática, mostrada a continuación:

$$P = CR - CF$$

siendo P = Profundidad, CR = Valor de cota de referencia para toda el área del embalse (viene dado por el nivel del agua en el embalse), CF = Valor de la cota de fondo en un lugar determinado. Se aplicó la fórmula utilizando como datos de entrada los modelos generados en la etapa anterior y con la ayuda del calculador de imágenes del SIG Idrisi-32. Las etapas anteriormente descritas se detallan en el flujograma procedimental (véase [figura 3](#)).

3. Resultados y discusión

3.1. Sedimentación del embalse

En el modelo digital del terreno (MDT), del año 1956, se observa como el área que cubre actualmente el embalse incluye la zona donde conflúan los ríos Chiquito y Grande, área con poca pendiente y de cotas (46 a 48 msnm) mínimas (véase [figura 4](#)).

Romero Méndez, A. y Montes Galbán, E. (2009): "Evaluación espacio – temporal de la sedimentación en el embalse Burro Negro, estado Zulia / Venezuela mediante el uso combinado de SIG – Ecosonda – DGPS", *GeoFocus (Artículos)*, n° 9, p. 209-231. ISSN: 1578-5157

De la misma manera, con la data levantada para el año 2002, se generó un modelo digital de fondo (MDF) que permite visualizar el relieve de fondo bajo el espejo de agua y los cambios ocurridos por la deposición de sedimentos, a los 42 años de la operación de llenado del embalse (1960) (véase [figura 5](#)).

Al compararse los dos modelos digitales (MDT 1956 y MDF 2002) pueden observarse unas áreas en los bordes con bajas profundidades (cotas 66 y 67 msnm), en los extremos norte y sur del embalse, debido a la acumulación de sedimentos. Existen allí cambios morfométricos en dichas áreas, en el caso de río Grande, al sur, se han creado unos montículos de sedimentos arenosos en forma de barreras alargadas que forman un canal natural por donde fluye el río hacia el embalse y áreas de muy poca profundidad que están casi colmatadas a la cota 67,80 msnm para el año 2002. Para el caso de río Chiquito, al norte, se aprecian áreas más extensas aun con las mismas características anteriores.

Para efectuar una comparación más precisa se trazaron perfiles sobre el modelo digital de fondo (MDF) 2002, en el caso del perfil longitudinal trazado en la zona del antiguo cauce del río Chiquito (véase [figura 6](#)) se observan diferencias de profundidad y una franja de entre 0,5 metros y 2,5 metros de sedimentos acumulados, mientras que en el caso de río Grande (véase [figura 7](#)) estas diferencias están entre 0,5 y 2 metros; estos resultados coinciden con los datos aportados por el MARN (2002) que indican que el aporte de sedimentos promedio anual es mayor en la subcuenca de río Chiquito que en la subcuenca de río Grande. Es importante aclarar que los perfiles, como indicadores o muestras, se trazaron en la porción central de lo que actualmente es el embalse.

Para tratar de esclarecer como evolucionó el fondo del embalse Burro Negro se generaron diagramas de bloques en diferentes secciones del embalse. En los mismos se aprecian como la geodinámica de los sedimentos ha originado que se depositen y cubran, casi en su totalidad, los antiguos cauces de los ríos y áreas adyacentes, esto se debe a que los embalses retienen la totalidad del material grueso que es transportado como "carga de fondo" y un porcentaje menor de sedimentos en suspensión y en flotación retenidos (Vericat y Batalla, 2004) (véase [figura 8](#) y [figura 9](#)).

Al superponer para comparar los contornos del espejo de agua de la situación inicial (1956), a la cota 67,80 msnm (nivel de aguas normales), con la situación actual (2002) a la misma cota, se observa que las áreas con mayor aterramiento en el embalse se localizan en la desembocadura de río Grande al sur.

Los sedimentos más gruesos (los finos están en suspensión y son en su mayoría exportados aguas abajo del embalse) producidos por la subcuenca del río Grande quedan parcialmente atrapados y concentrados (como carga de fondo) en el área de entrada al embalse por su menor profundidad, mientras que en el caso de río Chiquito, al norte, los sedimentos (más gruesos) producidos por esta subcuenca penetran y se depositan dispersos más al centro del embalse con mayor facilidad, por su mayor profundidad (véase [figura 10](#)).

Romero Méndez, A. y Montes Galbán, E. (2009): "Evaluación espacio – temporal de la sedimentación en el embalse Burro Negro, estado Zulia / Venezuela mediante el uso combinado de SIG – Ecosonda – DGPS", *GeoFocus (Artículos)*, n° 9, p. 209-231. ISSN: 1578-5157

Los efectos de estos aterramientos traen como consecuencia que las áreas azolvadas y/o colmatadas (al interior de lo que antes era el espejo de agua inicial) forman lagunas dispersas y charcos de agua aisladas del resto del cuerpo de agua principal. Sólo fluyen en periodos de plenitud de aguas encontrándose putrefactas (específicamente cuando los niveles de agua son menores a la cota 67,80 msnm) generando su degradación acelerada, tiende a la contaminación y la consiguiente pérdida de calidad del agua. Ello ocasiona diversos problemas agudos a los usuarios, tales como: malos olores, turbidez, sabores indeseables, costos extras para potabilizar el agua y disminución de la producción en la planta de tratamiento.

3.2. Consecuencias directas de la sedimentación

Según la memoria descriptiva del proyecto, las especificaciones, planos para la construcción de la presa, obras de toma, salidas, aliviadero y tapones de la divisoria del embalse de Burro Negro establecen: "La capacidad total estimada del embalse es de 71 millones de metros cúbicos de los cuales alrededor de 60 millones de metros cúbicos son netos y el resto almacenará sedimentos" (INOS, 1958). La diferencia entre ambos valores es el volumen muerto, estimado en 11 millones de metros cúbicos de la capacidad total. Así quedó establecido por los proyectistas de la obra, para depositar los sedimentos acumulados durante una vida útil de 100 años. Estos últimos cálculos se consideran solamente como referencia preliminar debido a la imprecisión de los métodos y técnicas de levantamiento y cálculos empleados para el año 1956.

Nuestros resultados (1956 y 2002) evidencian la disminución del volumen o capacidad total y el área inundada del embalse puesto que en el año 1956, a la cota 67,80 msnm, almacenaba potencialmente (según nuestros cálculos) 80 millones de metros cúbicos, mientras que para el año 2002, a la misma cota, almacenaba 70 millones de metros cúbicos. Existiendo una diferencia o pérdida de capacidad de almacenaje útil de 10 millones de metros cúbicos equivalentes a un 8,57% del total, por los sedimentos acumulados y ocupado el volumen muerto previsto en el proyecto para precipitar y depositar los sedimentos y detritos.

Al visualizar e interpretar los resultados, a través de las curvas de área-capacidad, (véase [figura 11](#)) se observa como la línea punteada delimitadora del área a ser inundada en 1956 alcanza un área de 1050 has, a la cota 67,80 msnm, a la misma cota y para el año 2002 solo inunda un área de 755 has. Ha perdido un 28,1 % (295 has de área inundada o extensión) del espejo de agua.

Al elevarse el fondo del embalse (por acumulación de sedimentos) se observan cambios en cuanto a las profundidades, disminuyen. Estas pueden ser evaluadas en los modelos batimétricos.

Para el año 2002 en las áreas de las desembocaduras de los ríos Chiquito y Grande las profundidades son menores observándose diferencias de entre 1 y 2 metros al comparar con la situación inicial simulada para el año 1956. Así mismo es de notar que en el área cercana a la antigua confluencia de río Chiquito y río Grande, las diferencias comparadas de profundidades perdidas son mayores y alcanzan los 2 y 3 metros de espesor de sedimentos y detritos (véase [figura 13](#) y [figura 14](#)).

Romero Méndez, A. y Montes Galbán, E. (2009): "Evaluación espacio – temporal de la sedimentación en el embalse Burro Negro, estado Zulia / Venezuela mediante el uso combinado de SIG – Ecosonda – DGPS", *GeoFocus (Artículos)*, n° 9, p. 209-231. ISSN: 1578-5157

Para el año 2002 en las mismas curvas se pueden precisar que desde la cota mínima a 46 msnm a la nueva cota mínima de 47 msnm el valor para el volumen almacenado es igual a cero (0 millones de metros cúbicos) debido a la acumulación de sedimentos en el área de la confluencia de río Chiquito con río Grande y próxima a las obras de captación y toma de agua del embalse.

También sobre la cota 65 msnm se visualizan y aprecian valores que expresan una disminución acentuada en la lectura del área inundada y un quiebre ascendente de dicha curva indicadora, ello permite inferir que la localización de las áreas con mayores efectos y consecuencias visibles del problema (aterramientos y colmatación de sedimentos) se encuentran en los extremos de cotas mas altas del embalse y en los bordes del espejo de agua, lugares de entrada de los flujos de agua que pierden competencia y precipitan los sedimentos gruesos. La menor área inundada a la cota 65 msnm, respecto a la misma situación para el año 1956, es prueba fehaciente también de un menor volumen de agua almacenada, es decir, volumen ocupado por la sedimentos (véase [figura 12](#)).

Algunas de las variables dependientes estimadoras del grado de sedimentación y colmatación son la disminución del área inundada, de la profundidad, del volumen almacenado y de la calidad del agua (Del Castillo, 1992), es por eso que al evaluar las profundidades se pueden derivar resultados y conclusiones que están estrechamente vinculadas con la colmatación y producción de sedimentos y materia orgánica lo cual afecta, a su vez, la calidad del agua, "el estudio del ciclo de agua en el marco de las cuencas hidrográficas no se refiere sólo a las relaciones entre climatología, hidrología y geomorfología, sino que tiene en cuenta todo el hidrosistema con otros ciclos físicos, químicos y biológicos: la calidad de las aguas, su contenido de productos en suspensión y en solución" (Philipponneau, 2001, p. 1).

4. Conclusiones y recomendaciones

Los resultados obtenidos nos conducen a las siguientes conclusiones y recomendaciones:

Aproximadamente a la mitad de su vida útil según el proyecto y después de 42 años de funcionamiento, para el año 2002, el volumen total de sedimentos precipitados en los fondos del embalse es de 10 millones de metros cúbicos lo cual representa un 8,57% del total.

Este resultado de la sedimentación total se considera bajo. Es decir, que aún le queda vida útil, de mantenerse las condiciones imperantes para el año 2002. Sin embargo se debe destacar que el incremento de las invasiones de agricultores, agudizadas a partir de esta fecha, de las áreas protegidas y de reserva hidráulica decretadas por el gobierno nacional no ha impedido el ecodidio que está en pleno desarrollo.

Ha perdido, en la práctica el espacio para contener el "volumen muerto" para sedimentos y detritos, por lo tanto está perdiendo la capacidad de almacenar volúmenes de agua aprovechables. Su extensión superficial o área del espejo de agua se ha reducido en 295 ha., lo cual representa un 28,1% del área total inicial. Esto implica que almacena menos cantidad de agua utilizable y las aguas embalsadas están cada vez mas turbias y degradándose continuamente.

Romero Méndez, A. y Montes Galbán, E. (2009): "Evaluación espacio – temporal de la sedimentación en el embalse Burro Negro, estado Zulia / Venezuela mediante el uso combinado de SIG – Ecosonda – DGPS", *GeoFocus (Artículos)*, n° 9, p. 209-231. ISSN: 1578-5157

Los sedimentos más pesados y transportados, como carga de fondo, precipitan al fondo del embalse al perder competencia las aguas vertidas y por el efecto de barreras y las ondulaciones del fondo que los interceptan en los extremos norte (río Chiquito) y sur (río Grande). Ello produce, en consecuencia, una gradación hidráulica en la deposición de los sedimentos, según su granulometría, a lo largo del embalse de tal forma que los sedimentos más pesados y grandes (arenas y limos) se depositan primero y cercanos al área inmediata a sus entradas o desembocaduras, los medianamente pesados (limos y arcillas) se precipitan luego y más alejados; finalmente los más livianos y pequeños (arcillas y materia orgánica) precipitan más lejos de los ríos y en menor cuantía porque se encuentran (en alta proporción) en suspensión, dilución y flotación; son vertidos y exportados aguas abajo del embalse.

Estas características granulométricas de los sedimentos (mayoritariamente finos) sumados al hecho de la localización de los ríos, muy alejada y al extremo norte y sur de las obras de captación o toma del agua, con respecto a las desembocaduras de los ríos: torre toma, salida de fondo, salidas por bombeo y vertedero de demasías o aliviadero, definen a este embalse como "Auto Limpiante", por cuanto logra exportar, fuera del vaso, una importante proporción de estos sedimentos suspendidos. De no ser así se estima que la sedimentación alcanzaría niveles alarmantes, aun cuando el problema es de solución apremiante por el déficit hídrico presente.

El abatimiento o descenso y ascenso rápido de los niveles de agua embalsada se hace más continuo, pronunciado, frecuente y oscilante. Es indicador del volumen de sedimentos precipitados y de disminución de su capacidad de almacenaje. La capacidad de controlar inundaciones, saneamiento de tierras y de protección de las instalaciones petroleras costeras en lago de Maracaibo disminuye en la misma proporción de la sedimentación acumulada.

La vida útil del embalse se pudiera prolongar, de mantenerse la misma situación del problema de la sedimentación para el año 2002, hasta un horizonte de más de 100 años. Pero lo apremiante del caso es que la demanda de agua se acelera constantemente, mientras la oferta decrece constantemente para esta cuenca hidrográfica insuficiente, al igual que las muy escasas fuentes de aguas fósiles o subterráneas existentes en la costa oriental del lago de Maracaibo, estado Zulia-Venezuela.

Por todo lo antes planteado, se recomiendan en forma general y preliminar, algunas posibles medidas de mitigación y/o atenuación que deben ser evaluadas por los especialistas en estos problemas:

- Declarar a la cuenca hidrográfica media y alta del río Pueblo Viejo, y especialmente al embalse Burro Negro, en emergencia para abordar con prontitud los problemas.
- Desalojar los pobladores y agricultores de las áreas vulnerables, especialmente donde el grado de las pendientes del terreno (cuenca alta y media) es susceptible a la erosión y contrario al plan de manejo de la cuenca.

Romero Méndez, A. y Montes Galbán, E. (2009): "Evaluación espacio – temporal de la sedimentación en el embalse Burro Negro, estado Zulia / Venezuela mediante el uso combinado de SIG – Ecosonda – DGPS", *GeoFocus (Artículos)*, n° 9, p. 209-231. ISSN: 1578-5157

- Efectuar remoción (controlando la turbidez), despeje y extracción de sedimentos, especialmente en las áreas extremas del embalse, en periodos de bajo nivel y menor turbidez de las aguas, para sanear y recuperar capacidad de almacenaje y mejorar la calidad del agua.
- Estudiar la viabilidad y factibilidad técnica y económica de diversas tecnologías existentes y probadas para la remoción de grandes volúmenes de sedimentos a corto y largo plazo (dragado de áreas y lagunas aisladas, hidrosucción confinada, sifonaje, túnel perimetral, entre otras).
- Evaluar los impactos ambientales en las áreas potencialmente aptas, en el entorno inmediato al embalse, para depositar los sedimentos que sean extraídos.
- Analizar alternativas para la construcción de obras hidráulicas de captación y retención de sedimentos (aguas arriba de los ríos Grande y Chiquito).
- Evaluar y controlar torrentes, cárcavas, movimientos en masa, entre otras medidas, para bajar la tasa de acarreo de sedimentos hacia el embalse.
- Monitorear anualmente, mediante levantamientos batimétricos en periodos de cotas o niveles altos, el fondo del embalse y especialmente el área circundante a la torre toma (unos 500 m aprox.) para prevenir las obstrucciones o taponamiento (por sedimentos) de las válvulas y/o compuertas inferiores de la torre toma del agua y evitar la captación excesiva de sedimentos que afecten el rendimiento, la calidad del proceso de filtrado y de los costos de tratamiento y potabilización de las aguas crudas.
- Reinstalación de la infraestructura instrumental para las observaciones, mediciones y registros de los sedimentos y otros parámetros hidroclimáticos, geomorfológicos, biológicos, entre otros, tan importantes y necesarios para evaluar y predecir el deterioro de esta cuenca y su cuerpo de agua dulce.
- Analizar periódicamente muestras de agua y de sedimentos para desarrollar: modelos predictivos, estudios morfométricos, hipsométricos y que muestren la evolución y tendencias del problema.
- Estudiar la factibilidad y viabilidad técnica - económica, de posibles alternativas para el reforzamiento y aumento de altura del dique o presa, taponés laterales y el aliviadero de demasías. Ello aumentará significativamente la capacidad de almacenaje y del volumen útil aprovechable del embalse para contrarrestar las pérdidas del volumen útil.

Romero Méndez, A. y Montes Galbán, E. (2009): "Evaluación espacio – temporal de la sedimentación en el embalse Burro Negro, estado Zulia / Venezuela mediante el uso combinado de SIG – Ecosonda – DGPS", *GeoFocus (Artículos)*, n° 9, p. 209-231. ISSN: 1578-5157

Agradecimientos

Se agradece a la Agenda para la Investigación Ambiental de la Cuenca del Lago de Maracaibo: Iniciativa Regional y a las instituciones participantes: Instituto para la Conservación de la Cuenca del Lago de Maracaibo (ICLAM), Universidad del Zulia LUZ-Centro de Estudios Geográficos, Fundacite-Zulia, Fondo Nacional para la Ciencia la Innovación y la Tecnología (FONACIT) y Petróleos de Venezuela-PDVSA por el financiamiento y colaboración prestada en el desarrollo de este proyecto de investigación.

Referencias bibliográficas

- Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas. CEEOP (2007): *Batimetría*. Ministerio de Fomento, España.
- Del Castillo, M. (1992): *Morfometría de lagos. Una aplicación a los lagos del Pirineo*. Universidad de Barcelona. Tesis Doctoral. España.
- Furnans, J. y Austin, B. (2008): "Hydrographic survey methods for determining reservoir volume". *Environmental Modelling and Software*, 23, p. 139-146.
- Instituto Nacional de Obras Sanitarias. INOS (1958): *Especificaciones y planos para la construcción de la presa, obras de toma, salidas, aliviadero y tapones de la divisoria del embalse de Pueblo Viejo*. Ingeniería de los suelos. Caracas / Venezuela.
- Ministerio del Ambiente y Recursos Naturales. MARNR (2002): *Informe técnico cuenca río Pueblo Viejo*. División de Cuencas Hidrográficas. Zulia / Venezuela.
- Moral, F. (2004): "Aplicación de la geoestadística en las ciencias ambientales". *Ecosistemas: Revista científica y técnica de ecología y medio ambiente*, 13 (1), pp. 78-86 [Consulta: 04-04-2008]. Disponible en www.revistaecosistemas.net/articulo.asp?id=167.
- Odhiambo, B.K. y Boss, S.K. (2004): "Integrated echo sounder, GPS, and GIS for reservoir sedimentation studies: examples from two Arkansas lakes". *Journal of the American Water Resources Association*, 40 (4), pp. 981-997.
- Phlipponneau, M. (2001): *Geografía aplicada*. Ariel, España.
- Sánchez, M. (2002): *Métodos geoestadísticos para la generación de modelos tridimensionales del subsuelo*. CIDIAT; trabajo de grado para optar al título de Magister Scientiae en "Recursos Hidráulicos". Mérida/Venezuela.
- Santos, M. (2000): *La naturaleza del espacio*. Ariel, España.
- Vericat, D. y Batalla, R. (2004): "Efecto de las presas en la dinámica fluvial del curso bajo del río Ebro". *Revista C&G*, 18 (1-2), pp. 37-5.

Romero Méndez, A. y Montes Galbán, E. (2009): "Evaluación espacio – temporal de la sedimentación en el embalse Burro Negro, estado Zulia / Venezuela mediante el uso combinado de SIG – Ecosonda – DGPS", *GeoFocus (Artículos)*, n° 9, p. 209-231. ISSN: 1578-5157

FIGURAS

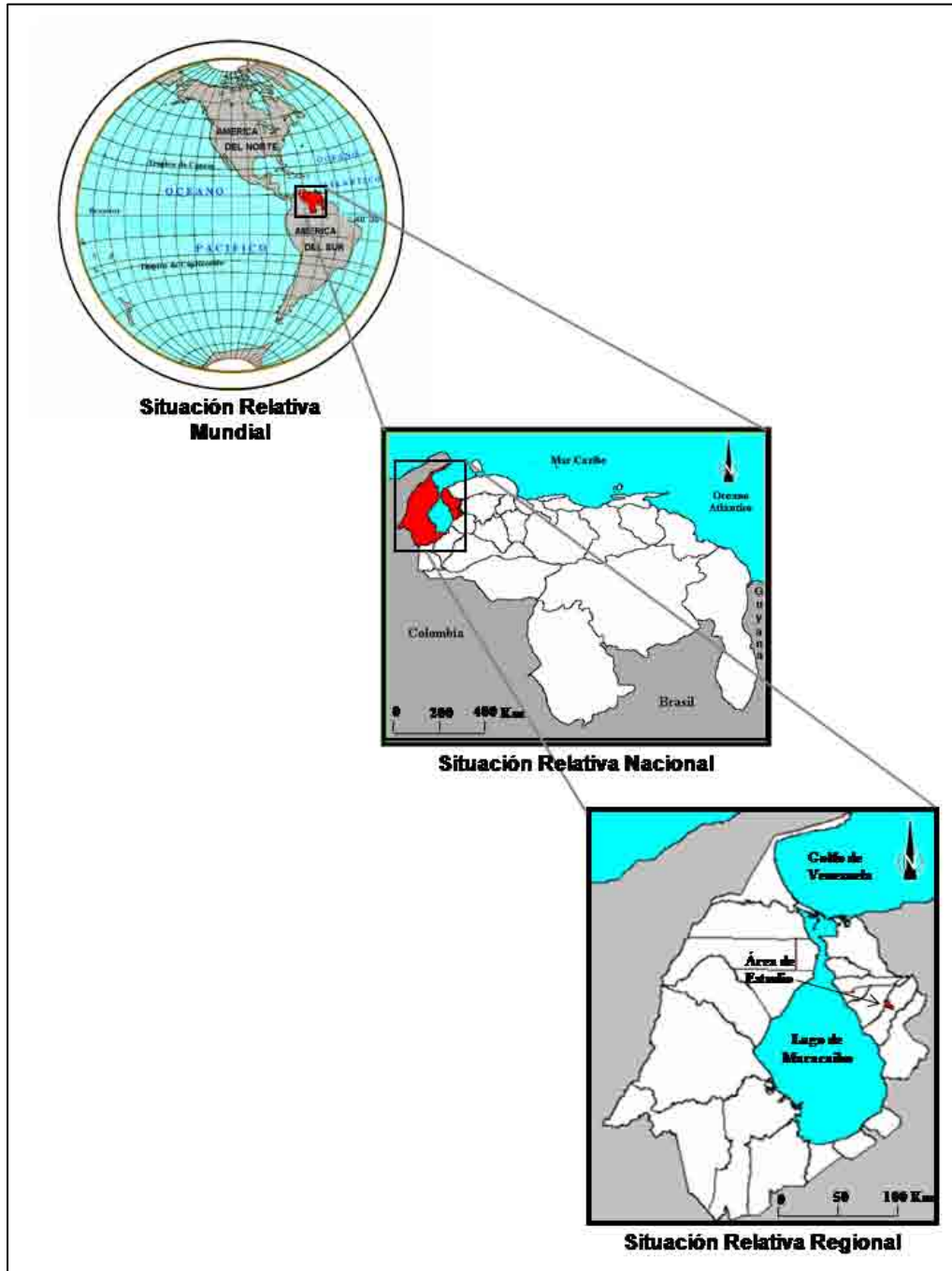


Figura 1. Situación relativa del área estudiada.

Romero Méndez, A. y Montes Galbán, E. (2009): "Evaluación espacio – temporal de la sedimentación en el embalse Burro Negro, estado Zulia / Venezuela mediante el uso combinado de SIG – Ecosonda – DGPS", *GeoFocus (Artículos)*, n° 9, p. 209-231. ISSN: 1578-5157

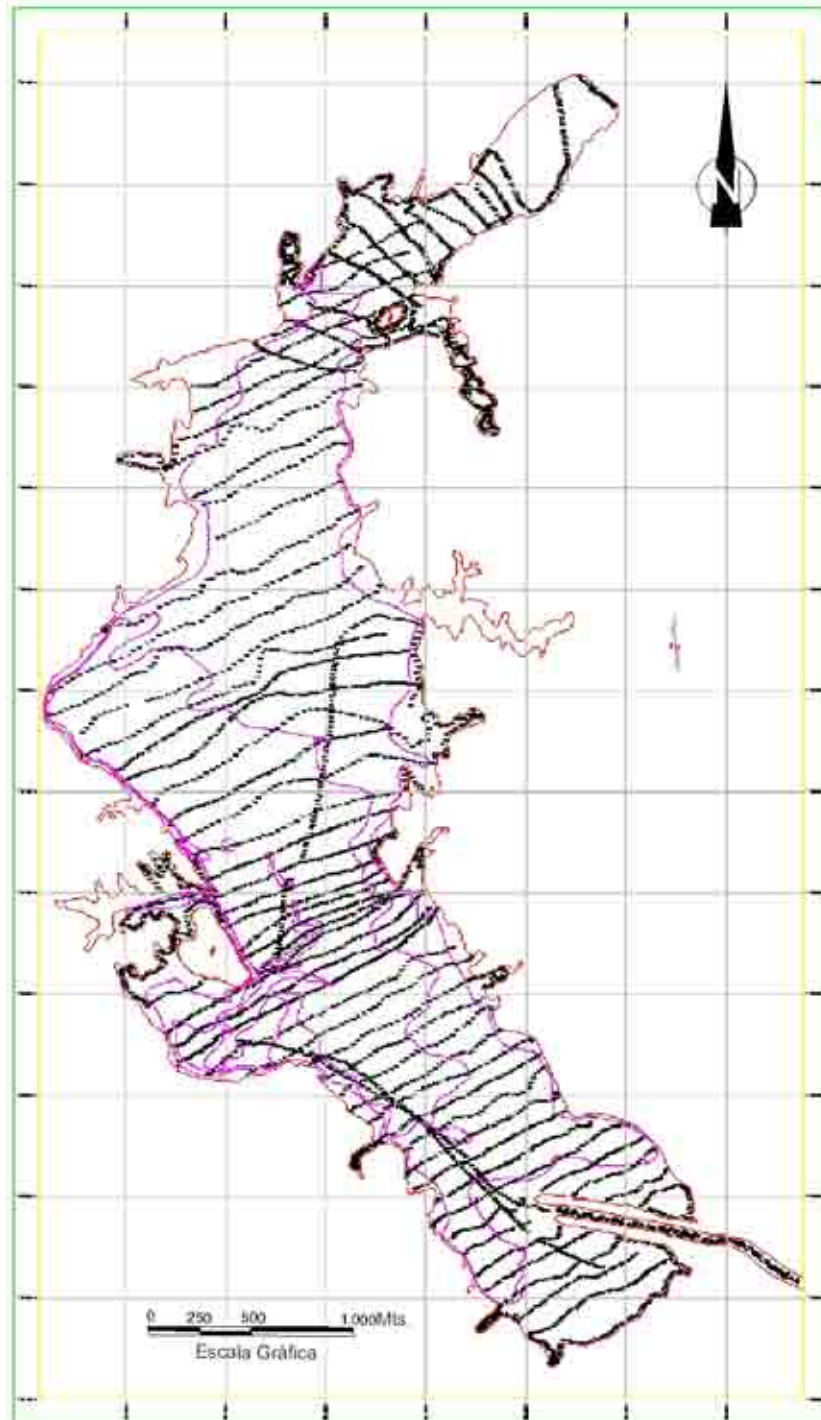


Figura 2. Trayectorias del ecosondeo o levantamiento batimétrico.

Romero Méndez, A. y Montes Galbán, E. (2009): "Evaluación espacio – temporal de la sedimentación en el embalse Burro Negro, estado Zulia / Venezuela mediante el uso combinado de SIG – Ecosonda – DGPS", *GeoFocus (Artículos)*, n° 9, p. 209-231. ISSN: 1578-5157

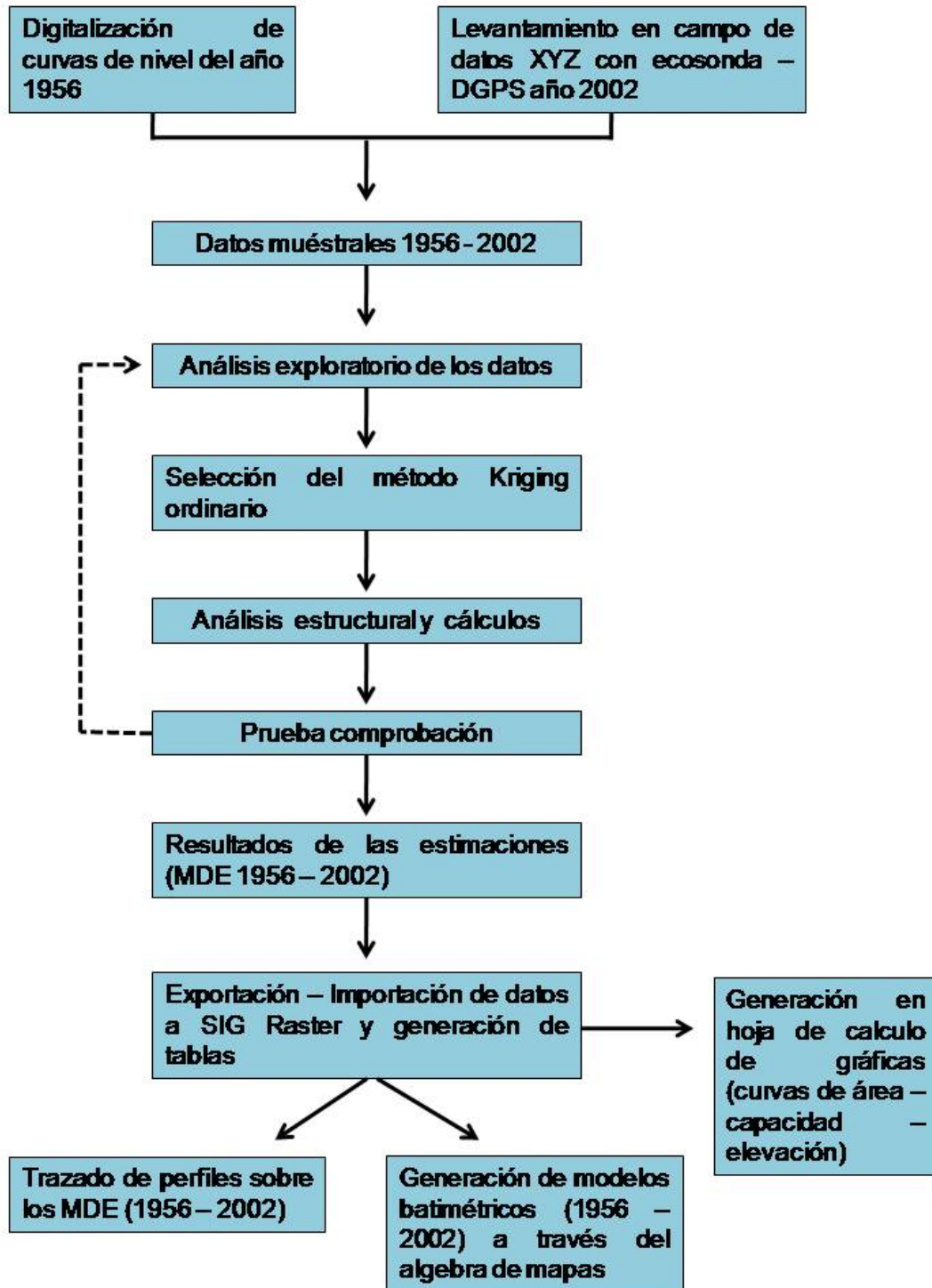


Figura 3. Flujograma de procedimientos de análisis.

Romero Méndez, A. y Montes Galbán, E. (2009): "Evaluación espacio – temporal de la sedimentación en el embalse Burro Negro, estado Zulia / Venezuela mediante el uso combinado de SIG – Ecosonda – DGPS", *GeoFocus (Artículos)*, n° 9, p. 209-231. ISSN: 1578-5157

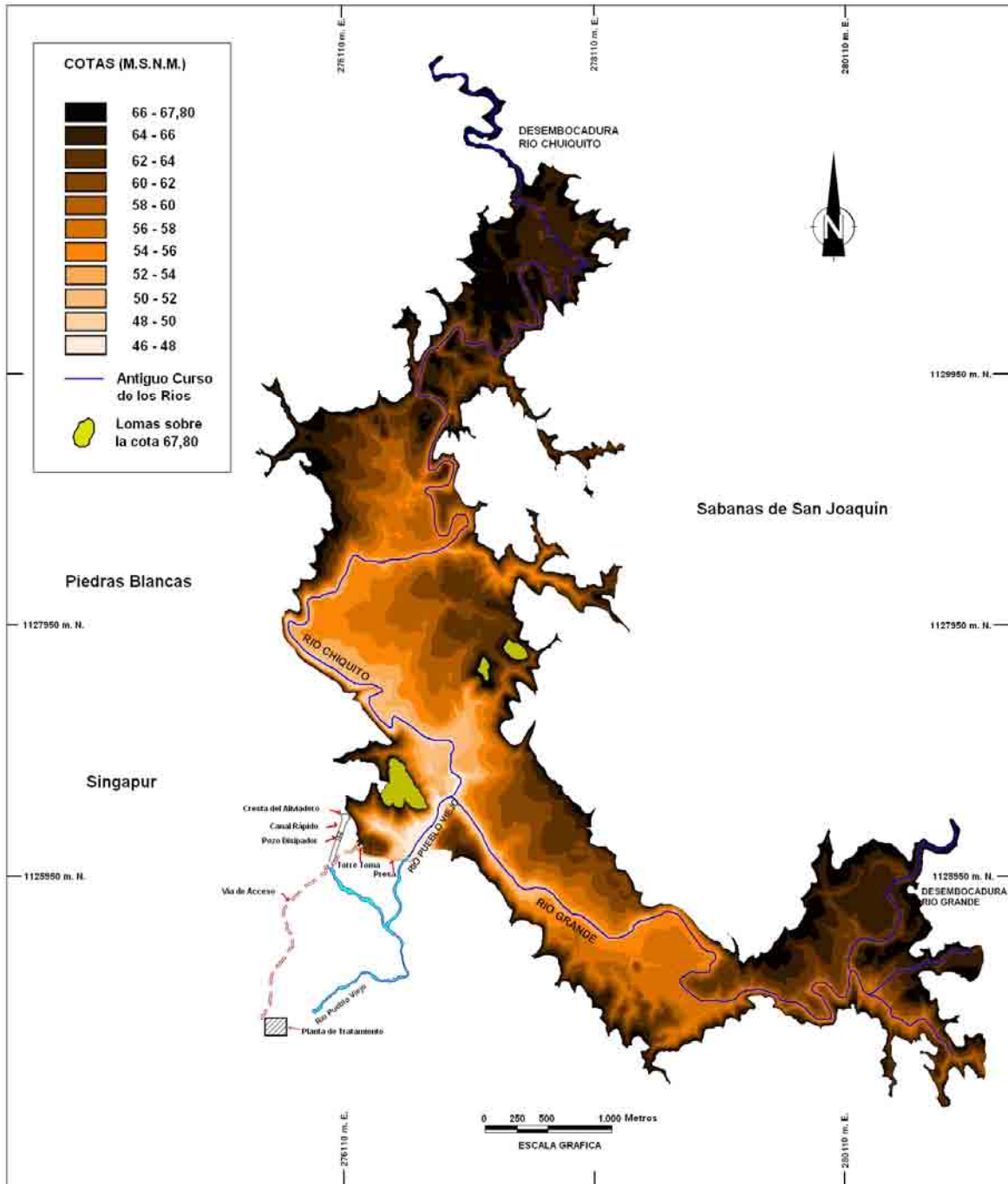


Figura 4. Modelo digital del terreno (MDT), año 1956.

Romero Méndez, A. y Montes Galbán, E. (2009): "Evaluación espacio – temporal de la sedimentación en el embalse Burro Negro, estado Zulia / Venezuela mediante el uso combinado de SIG – Ecosonda – DGPS", *GeoFocus (Artículos)*, n° 9, p. 209-231. ISSN: 1578-5157

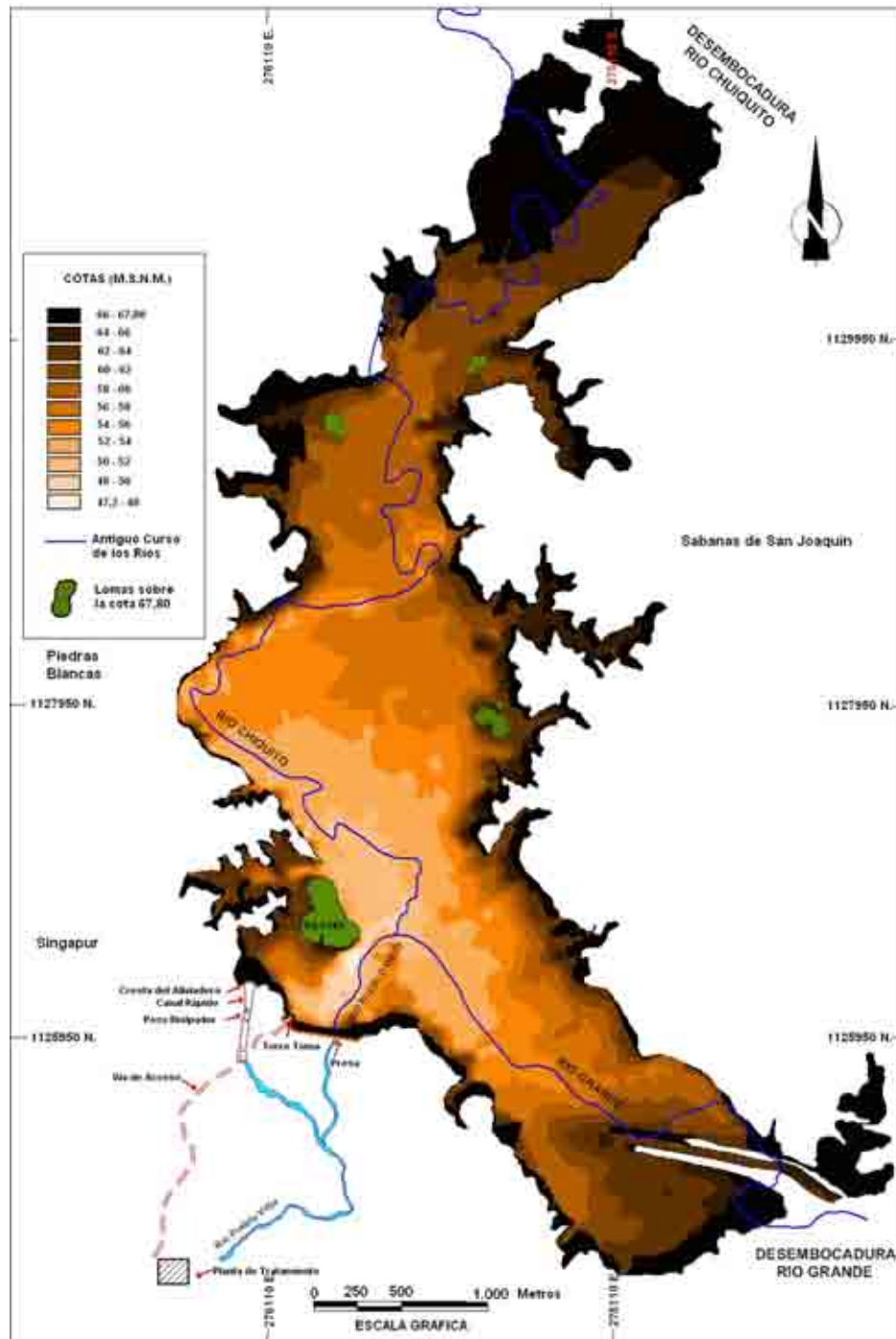


Figura 5. Modelo digital de fondo (MDF), año 2002.

Romero Méndez, A. y Montes Galbán, E. (2009): "Evaluación espacio – temporal de la sedimentación en el embalse Burro Negro, estado Zulia / Venezuela mediante el uso combinado de SIG – Ecosonda – DGPS", *GeoFocus (Artículos)*, n° 9, p. 209-231. ISSN: 1578-5157

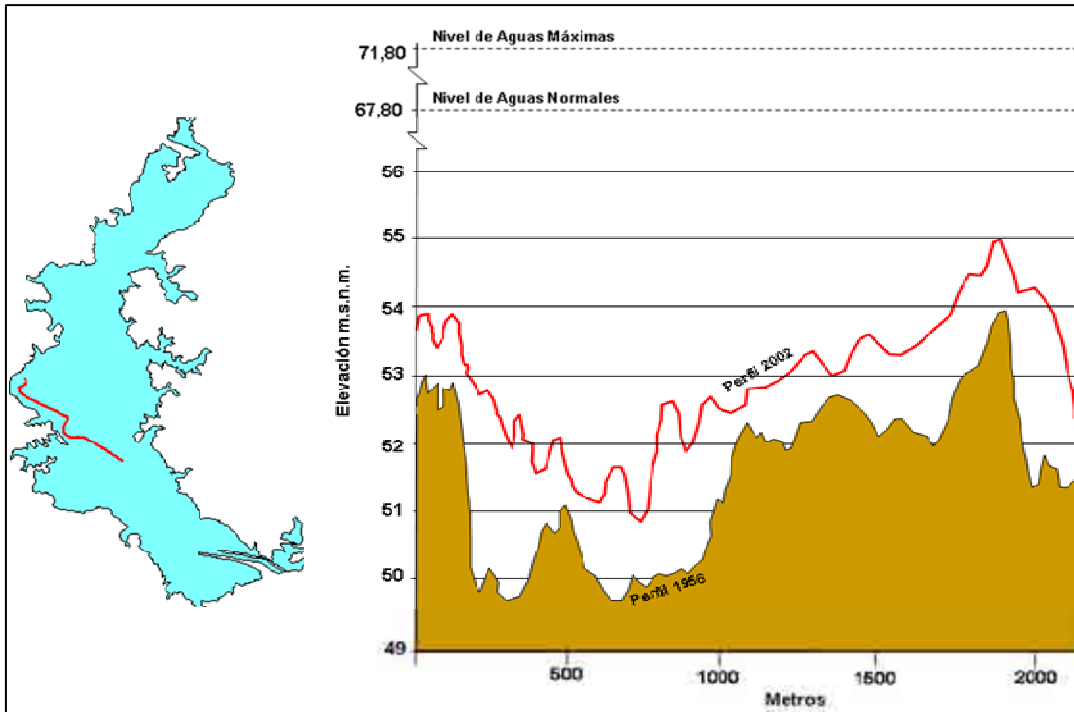


Figura 6. Perfil longitudinal del río Chiquito.

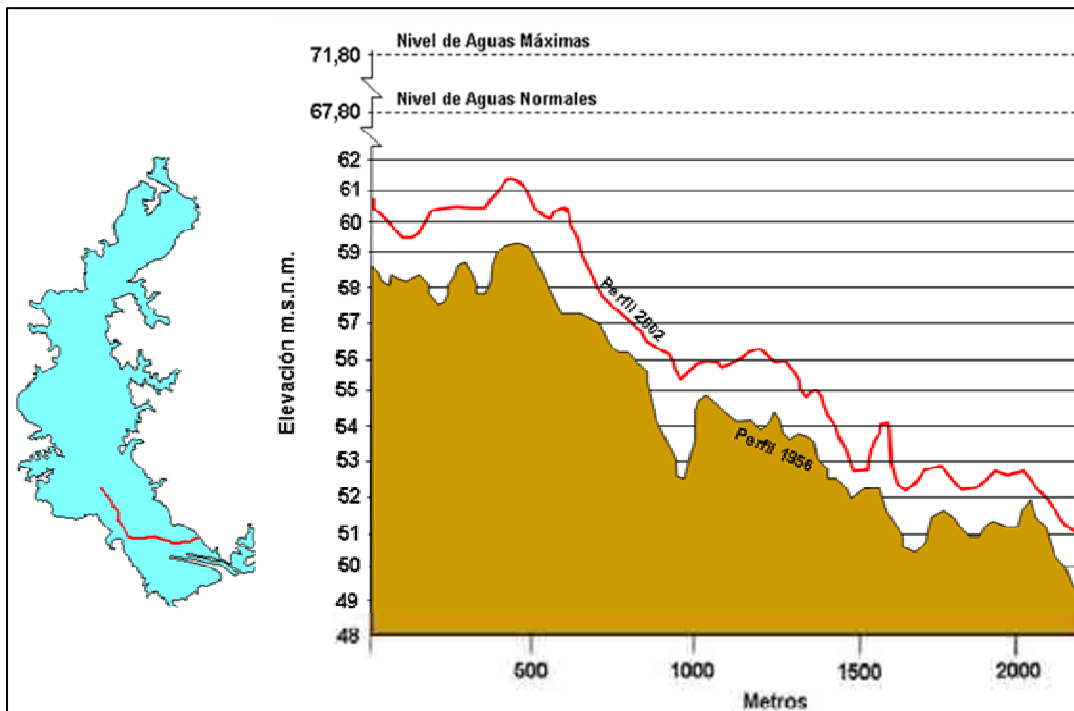


Figura 7. Perfil longitudinal del río Grande.

Romero Méndez, A. y Montes Galbán, E. (2009): "Evaluación espacio – temporal de la sedimentación en el embalse Burro Negro, estado Zulia / Venezuela mediante el uso combinado de SIG – Ecosonda – DGPS", *GeoFocus (Artículos)*, n° 9, p. 209-231. ISSN: 1578-5157

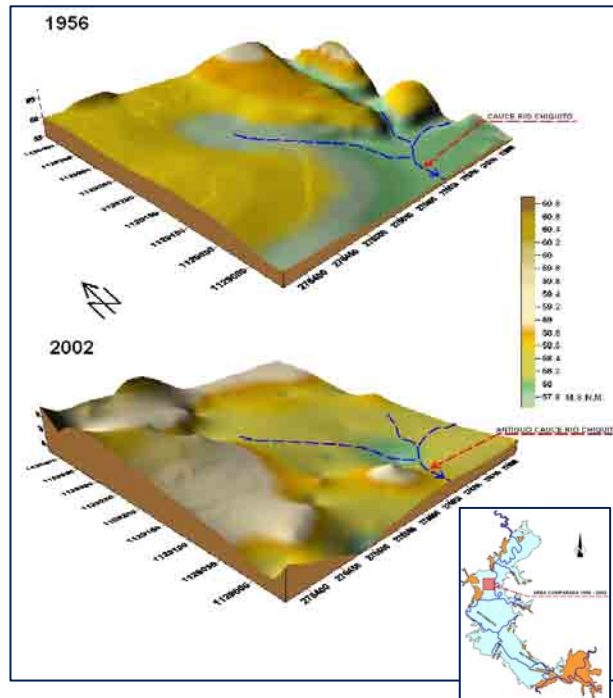


Figura 8. Bloque diagrama en perspectiva del área del río Chiquito.

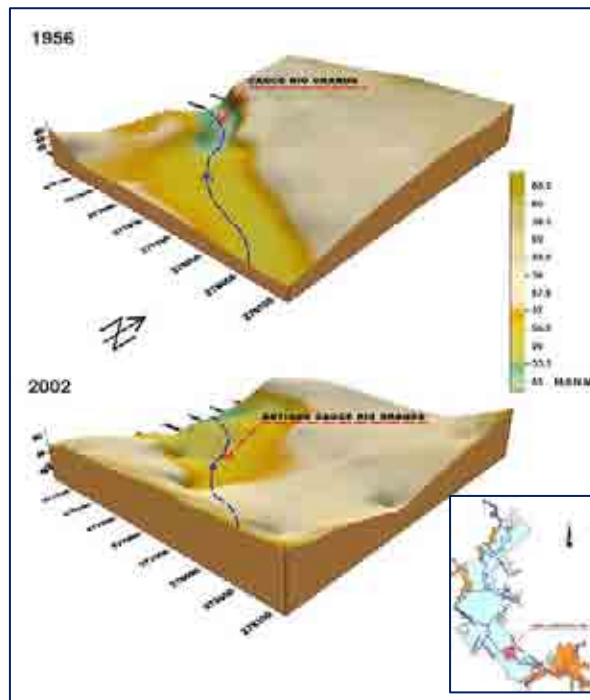


Figura 9. Bloque diagrama en perspectiva del área del río Grande.

Romero Méndez, A. y Montes Galbán, E. (2009): "Evaluación espacio – temporal de la sedimentación en el embalse Burro Negro, estado Zulia / Venezuela mediante el uso combinado de SIG – Ecosonda – DGPS", *GeoFocus (Artículos)*, n° 9, p. 209-231. ISSN: 1578-5157

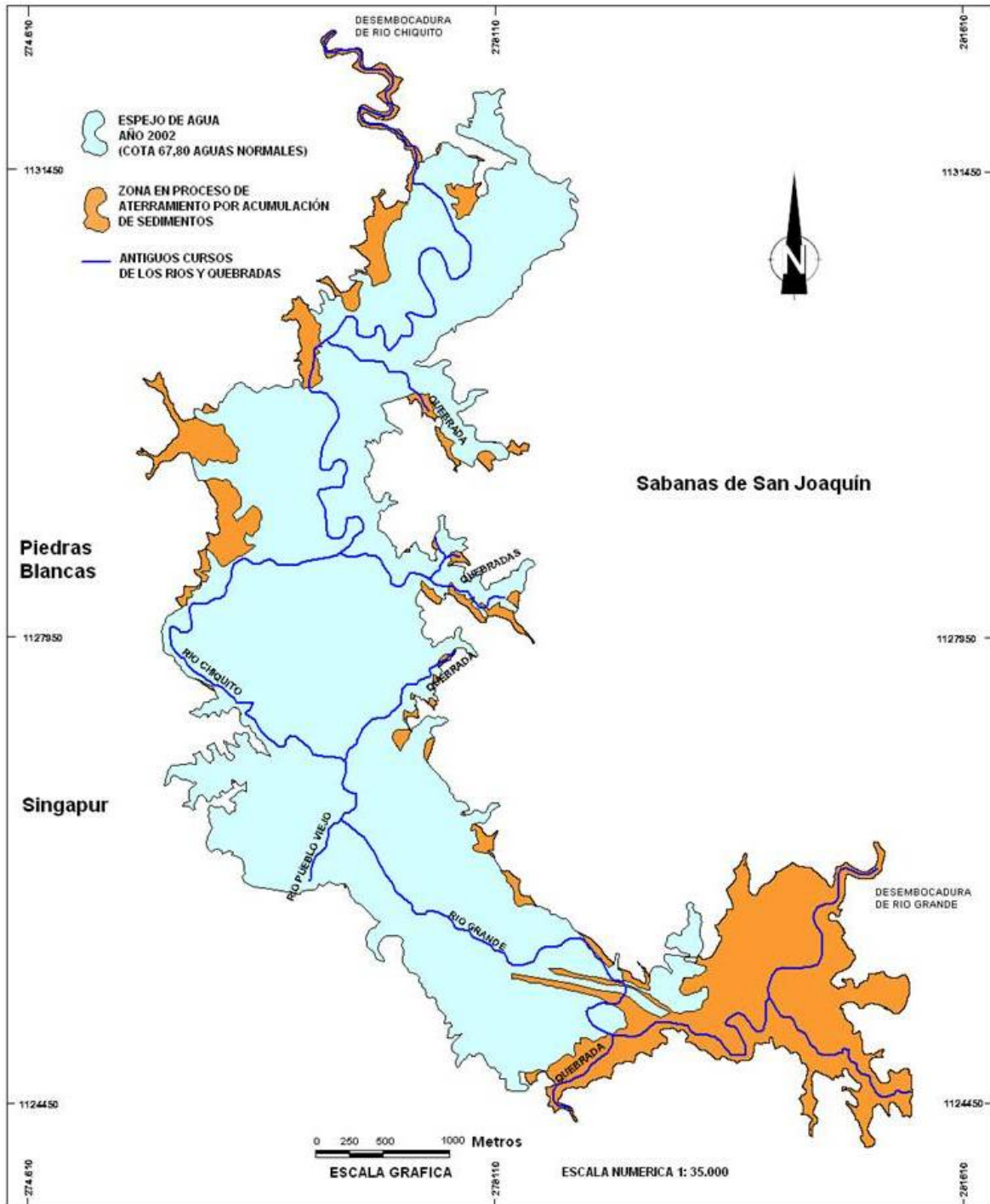


Figura 10. Áreas con aterramiento y pérdida de almacenamiento de agua.

Romero Méndez, A. y Montes Galbán, E. (2009): "Evaluación espacio – temporal de la sedimentación en el embalse Burro Negro, estado Zulia / Venezuela mediante el uso combinado de SIG – Ecosonda – DGPS", *GeoFocus (Artículos)*, n° 9, p. 209-231. ISSN: 1578-5157

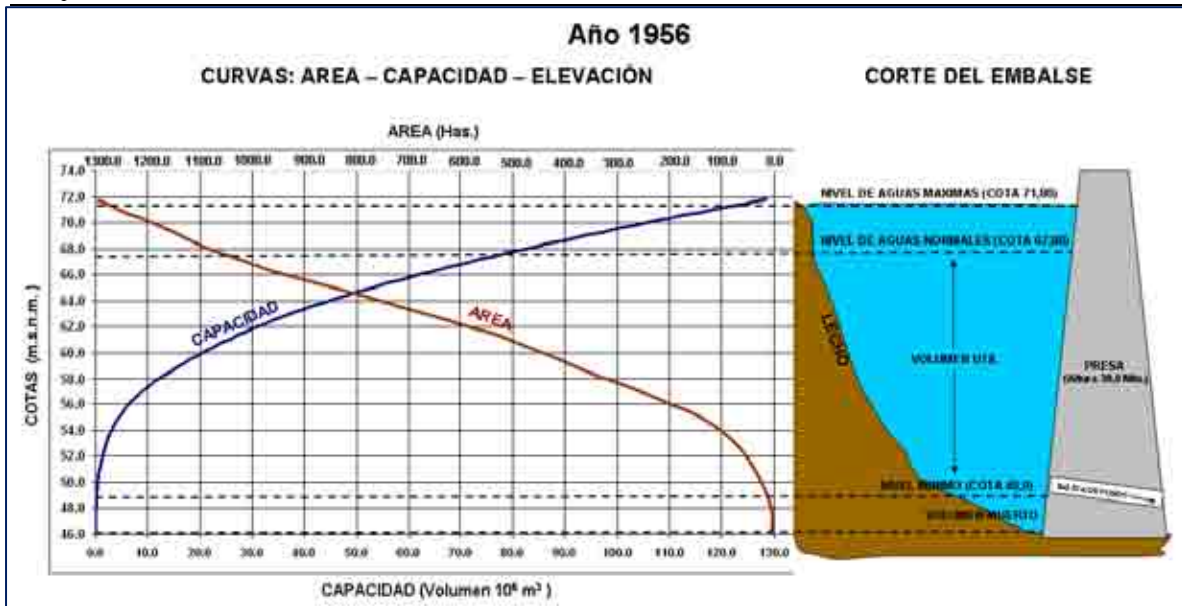


Figura 11. Gráfico de área, capacidad y elevación para el año 1956.

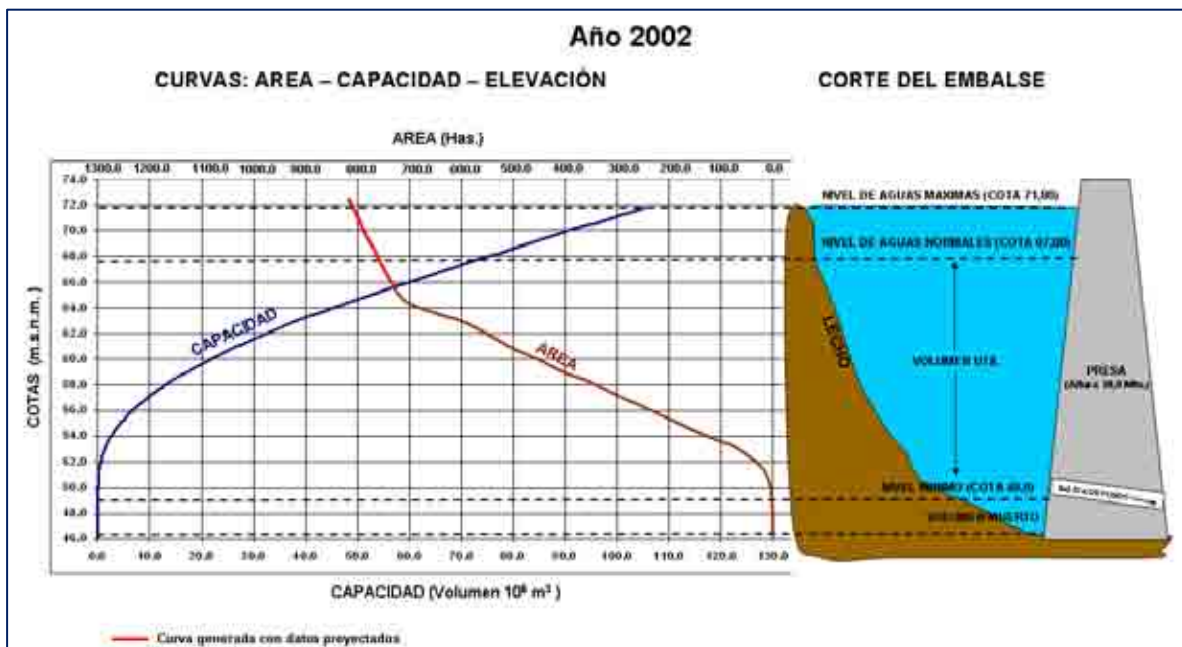


Figura 12. Gráfico de área, capacidad y elevación para el año 2002.

Romero Méndez, A. y Montes Galbán, E. (2009): "Evaluación espacio – temporal de la sedimentación en el embalse Burro Negro, estado Zulia / Venezuela mediante el uso combinado de SIG – Ecosonda – DGPS", *GeoFocus (Artículos)*, n° 9, p. 209-231. ISSN: 1578-5157

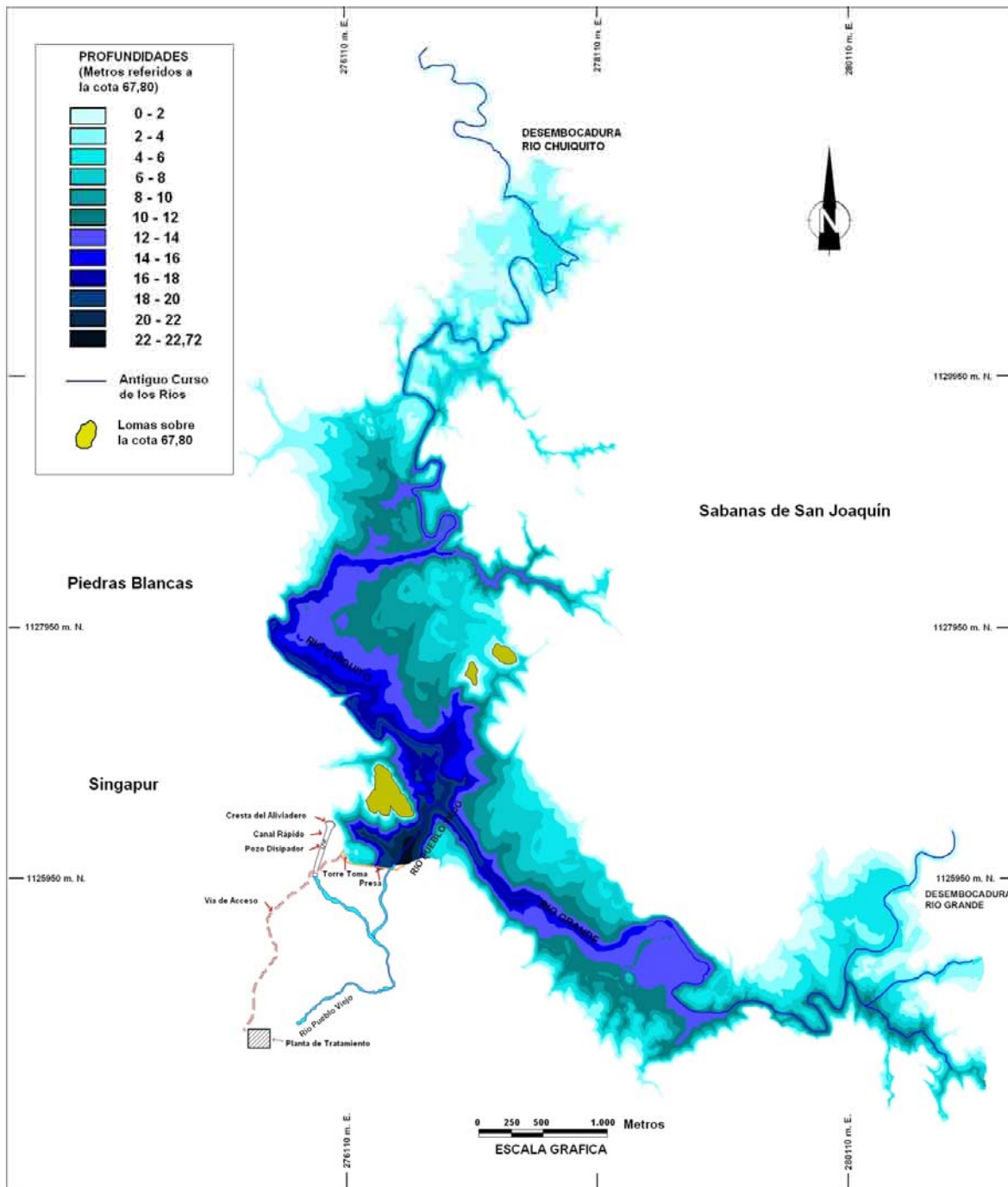


Figura 13. Modelo digital batimétrico año 1956.

Romero Méndez, A. y Montes Galbán, E. (2009): "Evaluación espacio – temporal de la sedimentación en el embalse Burro Negro, estado Zulia / Venezuela mediante el uso combinado de SIG – Ecosonda – DGPS", *GeoFocus (Artículos)*, n° 9, p. 209-231. ISSN: 1578-5157

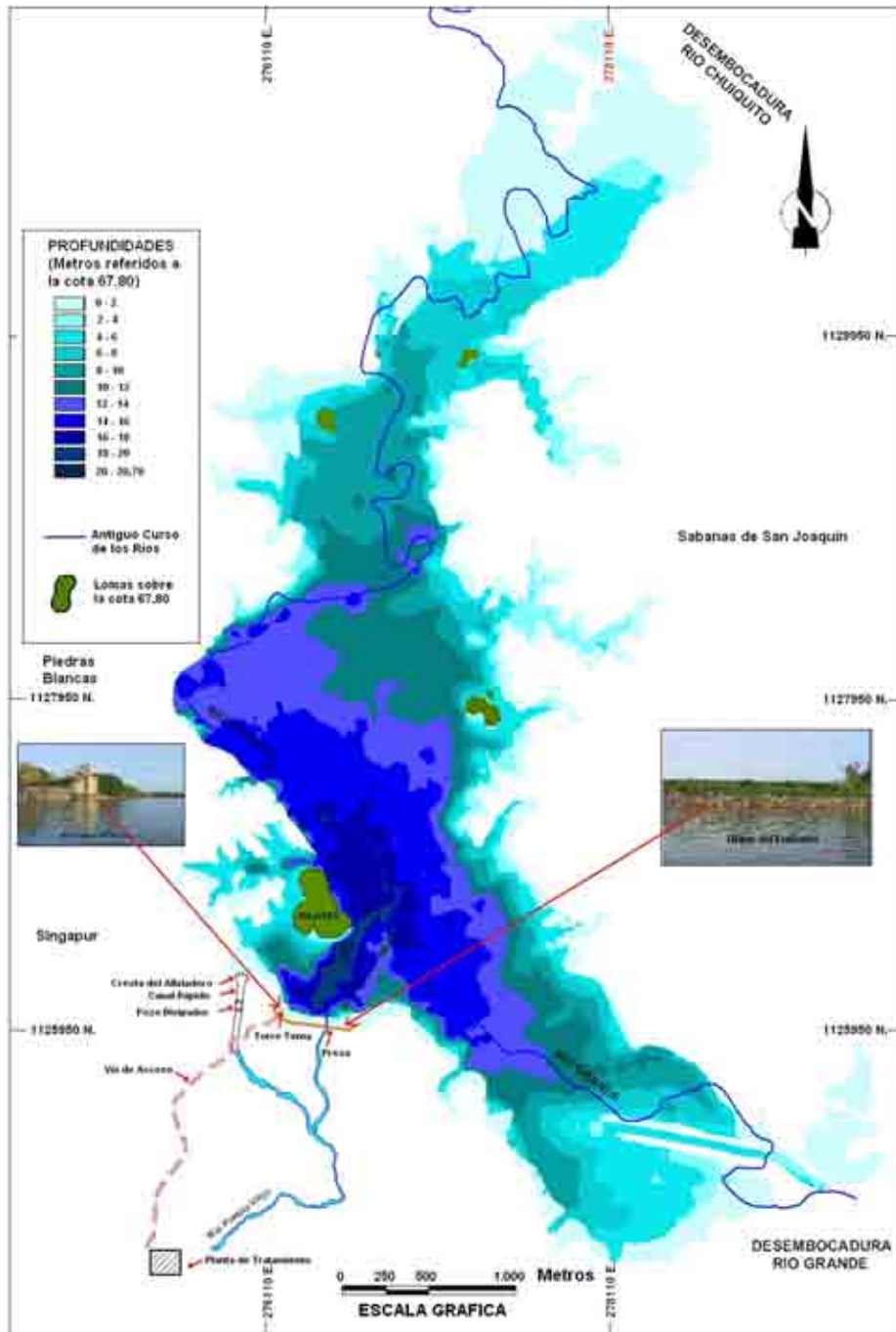


Figura 14. Modelo digital batimétrico año 2002.