



UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO HENRÍQUEZ UREÑA
FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

**DISEÑO DE UN EMBALSE DESDE EL PUNTO DE VISTA
HIDROLÓGICO EN LA CUENCA DEL RÍO BOBA, REPÚBLICA
DOMINICANA, UTILIZANDO EL SOFTWARE ARCGIS 10.3.**

Para optar por el título de:

Ingeniero Civil

Sustentado por:

Saudy Antonio Comas Navarro

Saúl Antonio Espino Ventura

Asesora:

Sandra José Clases

Santo Domingo, República Dominicana, ENERO del 2018.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, gracias a **Dios** por darme la fuerza para luchar por mis sueños, por darme fe, por ser mi amigo, porque sin El nada es posible.

Gracias a mis Padres, **Antonio Espino De La Cruz** y **Esperanza Ventura Castro**, por ser los mejores padres que un hijo puede tener. Gracias por su entrega durante todos estos años de estudios, por todos sus sacrificios y comprensión, esto es de ustedes.

A mi hermana, **Ana Esther Espino Ventura**, por ser una de mis fuentes de motivación e inspiración.

A mi tía **Claritza**, por comportarse siempre como una madre conmigo desde siempre.

A mis amigos de toda la vida, **Jonatan David Frías Acevedo**, **Lawrence Enmanuel François Toribio**, **George Benjamín Garnett**, **Raymond Coplin**, **Bibi Báez Ciriaco**, **Indira Carbuccia** y **Carmen de la Cruz**, por todo su apoyo y siempre confiar en mí.

A **Carlos Joel Novas Ozuna**, **Juan Enrique Arambolo Romero** y **Rony de los Santos**, por su amistad sincera y mostrar siempre su apoyo hacia mí.

A mis compañeros del **team 902** y el **team Melaza**, por hacer de este trayecto algo inolvidable, ustedes hacían los días menos pesados.

A mi amigo y compañero de tesis **Saudy Antonio Comas Navarro**, por todo el apoyo brindado en el transcurso de la carrera, por ser un compañero responsable y colaborador, por ser un buen amigo.

A nuestra asesora, **Sandra Esther José Clases**, por ser tan comprensiva, paciente y motivadora. Gracias por todo su apoyo y entrega.

Al Ingeniero Héctor Iñiguez del **INDRHI**, por su ayuda desinteresada y el apoyo brindado.

Al servicio Geológico Nacional, en especial a **Annette Suardi**, por su gran ayuda para que se realizara este proyecto.

Saúl Antonio Espino Ventura

AGRADECIMIENTO

Te agradezco a ti mi **Dios**, todo poderoso por darme la capacidad de alcanzar tan semejante logro como es el de culminar mi carrera, sin ti nada es posible.

A mis padres, **Lourdes María Navarro** y **Antonio Comas** con quienes estaré eternamente agradecido por la oportunidad de vida que me dieron, por ser el motivo de inspiración y superación profesional todos los días de mi vida. Este logro es por ustedes y para ustedes.

A mis hermanos **Marlin, Harold, Samel** y especialmente a ti **Yeymi Comas** por haberme hecho el camino más cómodo, agradezco infinitamente todo el apoyo y la paciencia que me brindaste durante la carrera y por todas esas noches de desvelo que compartimos haciendo tarea y estudiando para los exámenes.

Agradezco a mis compañeros **Rony de los Santos** y **Carlos Joel Novas** por hacer de los días universitarios más entretenidos. Agradezco al **team 902** y **team Melaza** por todos los buenos momentos que solo se viven en la universidad.

A los catedráticos que con el pasar de los años se convirtieron en mi ejemplo a seguir.

A la Universidad (**UNPHU**) que me abrió sus puertas para ser mejor persona y buen profesional.

A mi compañero de tesis **Saúl Antonio Espino Ventura** que ha sido mi amigo desde el inicio de esta carrera, joven responsable, inteligente y buen amigo.

A la Ingeniera **Sandra José Clases** por brindarnos sus conocimientos como asesora para la realización de tan importante proyecto.

Saudy Antonio Comas Navarro

DEDICATORIA

A **Dios**, porque con El todo es posible.

A toda mi familia por el apoyo constante, el cariño, sacrificio, entrega y confianza que he recibido de ustedes desde siempre.

A todos mis amigos por siempre motivarme y ayudarme en los momentos difíciles.

A cada profesor que he tenido hasta la fecha, porque gran parte de lo que soy hoy se lo debo a lo que he aprendido de ustedes.

Saúl Antonio Espino Ventura

DEDICATORIA

A **Dios**, dador de todo.

A mis padres, Lourdes Navarro y Antonio Comas por haberme dado la vida que es el tesoro más preciado del mundo

A mis hermanos por lo que representan para mí y por ser parte importante de una hermosa familia.

A mis amigos por creer en mí y ayudarme en todo momento.

A los profesores que aportaron su grano de arena para alcanzar la meta.

Saudy Antonio Comas Navarro

Índice De Contenido

Introducción	1
Capítulo 1: Problema de la Investigación	3
1.1. Planteamiento y formulación del problema	4
1.2. Preguntas de investigación	5
1.3. Objetivos de la investigación.....	5
1.3.1. Objetivo general.....	5
1.3.2. Objetivos específicos:.....	5
1.4. Justificación	6
1.5. Antecedentes	8
Capítulo 2: Marco Teórico	12
2.1. Hidrología	13
2.2. Ciclo hidrológico.....	13
2.3. Precipitación.....	14
2.3.1. Medición de la precipitación.....	14
2.4. Escurrimiento	15
2.4.1. Medición del escurrimiento	16
2.5. Evaporación.....	18
2.5.1. Medición de la evaporación	18
2.6. Temperatura.....	19
2.6.1. Medición de temperatura	19
2.7. Hidrograma.....	20
2.8. Gasto de diseño.....	21
2.9. Embalse	22
2.10. Generación de embalses.....	22
2.10.1. Embalses naturales.....	22
2.10.2. Embalses artificiales	23
2.11. Zonas de un embalse.....	23
2.11.1. Zona riberrina o cola del embalse	23
2.11.2. Zona de transición o zona media del embalse.....	24
2.11.3. Zona lacustre o zona de presa.....	24

2.12. Estructuras que conforman los embalses	25
2.12.1. Presas	26
2.12.2. Aliviadero o vertedor	27
2.13. Uso de los embalses	27
2.14. Ventajas y desventajas de los embalses	28
2.14.1. Ventajas de los embalses	28
2.14.2. Desventajas de los embalses.....	29
2.15. Volúmenes característicos de un embalse.....	29
2.16. Caudales característicos de un embalse	30
2.17. Localización de la cuenca	31
2.18. Geometría de la cuenca	31
2.19. Hidrología de la cuenca del río Boba.....	32
2.20. Sub-cuencas del rio Boba	33
2.21. Parámetros climáticos.....	35
2.22. Precipitación.....	35
2.23. Evaporación.....	36
2.24. Temperatura.....	36
2.25. Geología de la cuenca del rio Boba	37
2.26. Suelos cuenca del rio Boba.....	38
Capítulo 3: Diseño Metodológico	40
3.1 . Enfoque de la investigación.....	41
3.2. Tipo de investigación.....	41
3.3. Procedimiento de la investigación	42
3.4. Método de investigación.....	42
3.5. Técnica de investigación	43
Capítulo 4: Diseño Hidrológico	44
4.1. Antigua metodología para diseño de embalses	45
4.2. Altura de la presa	45
4.3. Cálculo del volumen muerto del embalse (VM).....	47
A: Teniendo en cuenta información de caudal y de sedimentos.....	48
B. Teniendo en cuenta el volumen útil del embalse	49
4.4. Cálculo del nivel mínimo para turbinas (NT).....	49

4.5. Cálculo del volumen útil (VU).....	49
4.6. Pérdidas de agua en el embalse.....	53
4.6.1. Evaporación.....	53
4.6.2. Infiltración	54
4.7. Cálculo del volumen de crecidas (VC)	54
4.8. Cálculo del borde libre (BL)	55
4.12 Nueva metodología	58
4.13. Pasos de aplicación de metodología nueva usando software ArcMAP versión 10.3.....	59
4.14. Modelo digital de profundidades.....	61
Capítulo5. Cálculos.....	66
A. Volumen muerto (Vm):	66
B. Volumen útil (Vu):	66
C. Volumen de infiltración (V inf):	66
D. Evaporación (Ve):	67
E. Volumen de escurrimiento (Ve):	67
F. Cálculo de altura de la presa (Hpresa):	67
G. Corona de la presa (B):	68
H. Tiempo de llenado (T):	68
Conclusiones	69
Recomendaciones	72
Bibliografía	73

Índice De Figuras Y Gráficos

Figura 1: Zonas de un embalse.....	25
Figura 2. Elementos constitutivos de un embalse.	26
Figura 3. Localización del embalse sobre el rio Boba.....	31
Figura 4. Mapa de ubicación de la Cuenca del rio Boba y sus afluentes.	32
Grafico 1. Parámetros climáticos estación Los Jengibres	37
Figura 6. Corte geológico Cordillera Septentrional.....	38
Figura 7. Clasificación de suelos de la cuenca del rio Boba.	39
Figura 8. Franjas imaginarias para el cálculo de la altura de una presa de embalse.	46
Figura 10. Área de aportación del embalse delimitada por ArcGIS.....	60
Figura 11. Área del embalse delimitado por ArcGIS en la cota 210 m.s.n.m.....	61
Figura 12. Modelo digital de profundidades (MDP) de la zona del embalse en la cuenca del rio boba.	62
Figura 13. Modelo digital de terreno (MDT) de la zona del embalse en la cuenca del rio boba.	63
Tabla No.1: área-volumen del embalse	64

Índice De Cuadros

Cuadro No.1: Viviendas afectadas por algún desastre natural	6
Cuadro No.2: Actividades económicas.....	7
Cuadro No.3. Promedios mensuales de precipitación en mm en estación Los Jengibres	35
Cuadro No. 4. Promedios mensuales de evaporación en mm en estación Los Jengibres	36
Cuadro No.5. Promedios mensuales de la temperatura en °C en estación Los Jengibres.....	36

**DISEÑO DE UN EMBALSE DESDE EL PUNTO DE VISTA
HIDROLÓGICO EN LA CUENCA DEL RÍO BOBA, REPUBLICA
DOMINICANA, UTILIZANDO EL SOFTWARE ARCGIS 10.3.**

Introducción

El presente trabajo de investigación se titula “Diseño hidrológico de un embalse en la cuenca del río Boba, República Dominicana, utilizando el software ArcMap 10.3.”, ubicada al noreste del País. Con esta investigación se persigue conocer la capacidad de almacenamiento total del embalse y por consiguiente conocer los volúmenes secundarios que lo conforman como son el volumen útil y el volumen muerto. A partir de estos volúmenes se puede conocer el nivel máximo de aguas y a raíz de este nivel se puede obtener la altura de la presa.

Realizar un diseño hidrológico es necesario porque permite conocer el volumen de agua que debe ser almacenado en el embalse para poder satisfacer la demanda, cumplir con el control de inundaciones y aumentar las áreas de riego.

Este diseño se realizará utilizando una nueva metodología aplicando el software ArcMap 10.3. Este programa ayudará a la obtención del volumen total de almacenamiento por medio de análisis de imágenes georreferenciadas y generación de una Red Irregular de Triángulos (TIN), por sus siglas en inglés. El TIN permite la generación de un modelo digital de profundidades (MDP), mediante el cual se puede iniciar el cálculo de la capacidad total de almacenamiento del embalse. Luego de conseguir la capacidad total de almacenamiento se utilizarán una serie de criterios para la estimación de los volúmenes que conforman la capacidad total de embalse.

Con este diseño se pretende conocer la capacidad de almacenamiento, el volumen útil o activo que está destinado a satisfacer la demanda de la zona, el volumen muerto por

acumulación de sedimentos, los volúmenes de pérdida, como son el de evaporación e infiltración. Por último, dar la altura de la cortina y el ancho la corona que brinda estabilidad a la cortina.

La investigación está formada por los siguientes capítulos:

- Capítulo 1: Se presentan el planteamiento del problema, objetivos generales y específicos, la justificación de la investigación y los antecedentes de la misma. También se presentan las preguntas que regulan la investigación.
- Capítulo 2: Este capítulo aborda los conceptos básicos de la hidrología que son necesarios para poder desarrollar un correcto diseño hidrológico, como son: Ciclo hidrológico precipitación, evaporación, entre otros. De igual manera se define el concepto de embalse, partes que lo conforman, tipos, usos, ventajas y desventajas. También se incluye la descripción detallada del lugar de estudio.
- Capítulo 3: Se establece el marco metodológico de la investigación.
- Capítulo 4: En este capítulo se explica detalladamente el proceso que se realizó para aplicar la nueva metodología de diseño para encontrar la capacidad total de embalse. También se detallan los criterios de obtención de los volúmenes restantes y dimensiones de la cortina del embalse.
- Capítulo 5: Presentación de resultados y conclusiones.

Capítulo 1: Problema de la Investigación

1.1. Planteamiento y formulación del problema

El notable crecimiento de la población ha traído consigo un aumento de la demanda de agua y sin duda alguna los embalses, que son estructuras que permiten almacenar las aguas en tiempo de abundancia de las mismas y compensar en tiempo de escasez representan una muy buena solución a esta problemática. En nuestro país existen un total de 34 embalses, de esos embalses sólo 9 son de gran almacenamiento y los restantes poseen una capacidad mediana (Benítez, 2017) , esto evidencia una falta en la preservación del agua en la República Dominicana.

La República Dominicana es un país que por su posición geográfica está en la ruta de las tormentas y huracanes que generalmente traen muchas lluvias, y por esto aumenta el nivel de los ríos ocasionando su desborde, lo cual afecta de manera directa a la población en el aspecto de salud, social y económico. Ahí viene la necesidad de diseñar embalses que permitan contener ese volumen de agua para luego aprovechar el mismo en las distintas actividades humanas.

El lugar seleccionado para el diseño hidrológico del embalse es la cuenca del río Boba, en la provincia María Trinidad Sánchez. El embalse estará ubicado poco después del poblado de Rancho Abajo, inmediatamente aguas abajo de la confluencia con el arroyo Guaigüi. Esta provincia es con frecuencia una de las más afectadas en el país cuando se producen estos fenómenos naturales y específicamente el río Boba, uno de los ríos más caudalosos de la zona, en varias ocasiones se ha desbordado y ha afectado las producciones agrícolas, vías de comunicación y hogares. En un reportaje realizado por el periódico Listín

Diario en mayo de 2009, algunos moradores afirman que sienten miedo del poder del Rio boba, al cual califican como un monstruo durmiente.

1.2. Preguntas de investigación

1. ¿Cuál es la capacidad total del embalse calculado con la implementación del programa ArcGIS 10.3?
2. ¿Cómo inciden los parámetros del clima de la zona en el embalse?
3. ¿Cuáles son los beneficios de realizar este embalse?
4. ¿En qué tiempo se llenaría el embalse en su totalidad?

1.3. Objetivos de la investigación

1.3.1. Objetivo general

Diseñar un embalse desde el punto de vista hidrológico en la cuenca de Rio Boba utilizando el software ArcGIS 10.3.

1.3.2. Objetivos específicos:

1. Determinar la capacidad total del embalse con la nueva metodología.
2. Evaluar el impacto de los parámetros climáticos de la zona en el embalse.
3. Establecer los beneficios del proyecto de embalse.
4. Determinar el tiempo de llenado de embalse.

1.4. Justificación

Conscientes de la importancia que representa el tema de inundaciones, disponibilidad de agua y una debida gestión del recurso hídrico en una cuenca, motiva a los sustentantes a presentar un diseño hidrológico de un embalse que pretende coadyuvar o contribuir con cualesquiera de las medidas a implementar a futuro por el gobierno, para el beneficio de las comunidades que están siendo actualmente afectadas dentro de la cuenca, entre ellas, el municipio de Nagua, que particularmente es altamente vulnerable a las crecidas del río Boba, el cual produce grandes inundaciones, afectando gravemente a los ciudadanos y la agricultura.(Ver Cuadro No.1)

Número de viviendas que han sido afectadas por algún desastre natural, según tipo de desastre, provincia María Trinidad Sánchez, 2010

Tipo de desastre natural	Provincia		% total país
	Viviendas	%	
Huracán	34,828	74.5	49.7
Tornado	8,561	18.3	7.5
Tormenta	36,746	78.6	56.7
Inundación	17,847	38.2	21.6
Lluvias torrenciales	20,722	44.3	37.2
Frío excesivo	2,718	5.8	9.3
Calor excesivo	7,598	16.3	24.1
Maremoto	3,804	8.1	1.7
Sequía	7,042	15.1	23.5
Derrumbe o deslizamiento de tierra	2,340	5.0	6.7
Hundimiento de tierra	612	1.3	3.1
Incendio	799	1.7	7.3
Terremoto	3,454	7.4	4.3
Otros	3,647	7.8	7.0

Fuente: IX Censo Nacional de Población y Vivienda 2010

Cuadro No.1: Viviendas afectadas por algún desastre natural

Fuente: IX Censo nacional de población y vivienda 2010

Estos datos nos muestran que la provincia María Trinidad Sánchez es propensa a sufrir muchos daños ante la presencia de algún desastre natural de carácter meteorológico.

En este caso se puede destacar que los huracanes han afectado el 74.5 % de las viviendas de la provincia que es un porcentaje abrumador y preocupante, pues supera en gran medida al porcentaje nacional de 49.7 %. En cuanto a las inundaciones, lluvias torrenciales y tormentas, se puede observar que las cifras de la provincia María Trinidad Sánchez son superiores al porcentaje nacional en ese mismo renglón. Esto evidencia una necesidad de estructuras para controlar inundaciones y que sirva para retener las aguas que caen en la zona producto de las precipitaciones de dichos fenómenos naturales.

Número de personas ocupadas por sexo, según rama de actividad, provincia María Trinidad Sánchez, 2010

Rama de actividad	Provincia				% total país
	Hombres	Mujeres	Total	%	
Total	30,639	13,322	43,961	100.0	100.0
Agricultura, ganadería y pesca	9,168	258	9,426	21.4	9.7
Industria y minería	2,160	483	2,643	6.0	11.9
Servicios financieros e inmobiliarias	1,182	559	1,741	4.0	6.0
Transporte y actividades relacionadas	2,341	156	2,497	5.7	6.7
Comercio y hostelería	8,389	4,098	12,487	28.4	28.3
Servicios domésticos	189	2,226	2,415	5.5	6.1
Administración pública	1,475	2,026	3,501	8.0	9.4
Construcción	2,913	69	2,982	6.8	6.7
Otros servicios	1,495	2,622	4,117	9.4	10.0
No declarada	1,327	825	2,152	4.9	5.2

Fuente: IX Censo Nacional de Población y Vivienda 2010

Cuadro No.2: Actividades económicas

Fuente: IX Censo nacional de población y vivienda 2010

Según el cuadro No.2, en la provincia María Trinidad Sánchez las actividades económicas que tienen mayor número de personas son la agricultura, ganadería, pesa y el área de comercio y hotelería.

En el caso de la agricultura, ganadería y pesca, un embalse ayudaría en gran manera a poder aumentar el número de terrenos que se ocupan para realizar estas actividades por medio del riego de las aguas. Aumentar el número de áreas de riego, aumentaría el número de empleados y como consecuencia aumentaría la producción y la recolección de ganancias producto de estas actividades, resultando beneficiados tanto la provincia como el país.

1.5. Antecedentes

La construcción de embalses nace desde la fuerte necesidad de acumular agua para el consumo humano, para riego de cultivos y consumo del ganado. En República Dominicana se cuenta con una gran cantidad de embalses-presas donde se pueden mencionar las más sobresalientes:

Presa de Hatillo

Situada entre las provincias Monseñor Nouel y Sánchez Ramírez, se alimenta con las aguas del río Yuna. Esta presa es la de mayor capacidad de almacenamiento de volumen de agua del país: almacena unos 700 millones de metros cúbicos, suministrando agua para riego, consumo doméstico y energía hidroeléctrica a la mayor parte de las poblaciones del Cibao Oriental (Ambiente, 2017) .

Presas de Jigüey, Aguacate, Valdesia y contra embalse de Las Barías

La presa Jigüey es la primera de cuatro presas sobre el río Nizao, seguida aguas abajo por la presa de Aguacate, la de Valdesia y el contra embalse de Las Barías. Estas presas emplean las aguas del río Nizao, entre las provincias Peravia, San José de Ocoa y San Cristóbal, en la región sur del país. Éste complejo hidroeléctrico tiene una capacidad de generación de 150 millones de megavatios, lo que lo convierte en el más grande de la isla en términos de producción de energía(Ambiente, 2017) .

El proyecto de presa de almacenamiento en el río Boba ha estado bajo estudio desde principios de la década de los años setenta (1970). El estudio más reciente fue realizado por la empresa consultora de Estados Unidos de Norteamérica CH2M Hill, la cual presentó en diciembre del año 1985 el informe de prefactibilidad ejecutado ese mismo año (INDRHI, Enero, 2017) .

Los trabajos de ejecución del proyecto Boba, en cuanto a la parte de los canales y diques, fueron iniciados en el año 1975, pero fueron paralizados en el 1980, donde solo fueron construidos 8 km del canal principal y el dique derivador (le faltó completar la protección de los taludes del estribo derecho). El diseño del canal principal se terminó hasta el km 19.8, incluyendo la mayor parte de los canales laterales y drenes no revestidos. A principios de la década de los 80 se realizaron estudios económicos para determinar si la construcción de una parte del proyecto era viable, concluyéndose una relación favorable de beneficio-costos a favor de completar el trabajo (INDRHI, Enero, 2017).

En el 1984, debido a que los fondos de financiamiento no estaban disponibles, el INDRHI solicitó ayuda a la AID (Ayuda Internacional Exterior) para completar un estudio de factibilidad para el proyecto completo. Antes de proceder con dicho estudio, la AID, a través de su Programa de Desarrollo Comercial, eligió llevar a cabo un reconocimiento del proyecto para determinar la cantidad de datos disponibles y definir mejor las características principales del mismo. (INDRHI, Enero, 2017)

Algunas tierras en la cuenca baja del río Boba durante años fueron irrigadas mediante el canal Agropampa, canal que era alimentado mediante un sistema de bombeo. A principios de la pasada década de los 70, el INDRHI planeó y diseñó un dique derivador para eliminar las bombas, así como un revestimiento de concreto para el canal de tierra. El proyecto total debía incluir 28.5 km de canal principal con capacidad de 12 m³/seg, 200 km de canales secundarios (laterales) y canales terciarios, 100 km de drenes no revestidos y un dique derivador con obra de toma directa y desarenador. Las etapas futuras deberían incluir una presa de embalse (reguladora) en Rancho Abajo (8 km aguas arriba del dique derivador), un túnel de 4.8 km, conducto a presión y casa de máquinas; y del canal principal, dos (2) aprovechamientos hidroeléctricos en caídas. (INDRHI, Enero, 2017)

En esta labor de investigación y consulta se encontró el trabajo de postgrado titulado **"Estudio de las inundaciones en la cuenca del río Boba y sus impactos ambientales, 2008, Nagua, Provincia María Trinidad Sánchez"** presentado en junio de 2012, por las

ingenieras civiles Sandra E. José Clases y Yenny Alt. Rodríguez Encarnación ante la unidad de postgrado en la Facultad De Ingeniería Y Arquitectura de la Universidad Autónoma de Santo Domingo (UASD), como requisito de optar por el título Máster en Ingeniería y Evaluación Ambiental.

Dicho trabajo tuvo como objeto evaluar los impactos ambientales en la planicie de inundación de la **cuenca del río Boba** a partir de la elaboración de un estudio hidrológico e hidráulico para la determinación de las áreas de inundación, y está orientado a determinar y evaluar los caudales de crecida causantes de las inundaciones en la parte baja de la cuenca del río Boba.

La recolección de los datos llevó a las investigadoras a realizar un plan de contingencia donde el objetivo básico de este programa fue ofrecer una respuesta oportuna y eficiente ante la manifestación de las inundaciones que afectan a la población, viviendas, infraestructuras, agricultura, ganadería, medio ambiente, etc. Este plan contiene los procedimientos específicos preestablecidos de coordinación, alerta, movilización y respuesta ante la ocurrencia o inminencia de un desastre, dicho plan permite saber qué acciones tomar ante riesgos y situaciones inesperadas, que puedan causar daños y lesiones físicas, muertes y pérdidas económicas, aplicando un programa de acción a desarrollar frente a cada situación.

Entre las recomendaciones que se alcanzaron plantear se encuentra la de construir una presa proyectada sobre el río Boba para control de inundación, lo cual justifica nuestro trabajo de grado, obteniendo de esta investigación información hidrológica necesaria para llevar a cabo el diseño hidrológico del embalse.

Capítulo 2: Marco Teórico

2.1. Hidrología

La Hidrología, según Dingman (1994), es “La ciencia que se enfoca al ciclo hidrológico global y a los procesos involucrados en la parte continental de dicho ciclo, es decir, es la geociencia que describe y predice:

- Las variaciones espaciales y temporales del agua en las etapas terrestre, oceánica y atmosférica del sistema hídrico global y; El movimiento del agua sobre y debajo de la superficie terrestre, incluyendo los procesos químicos, físicos y biológicos que tienen lugar a lo largo de su trayectoria”. (Peña Bruñol & Jacobo Villa, 2006)

2.2. Ciclo hidrológico

El ciclo se inicia con la evaporación del agua de las grandes superficies de almacenamiento gracias a la acción de los rayos solares y el viento, trasladándose hacia capas superiores de la atmósfera, esta evaporaciones la formadora de nubes que, al condensarse, forman la lluvia, el granizo o la nieve; una vez que ocurre la precipitación sobre la superficie, una parte queda retenida para volverse a evaporar, otra cantidad se infiltra en el suelo y una pequeña parte escurre, formando los cauces naturales por los que regresa a los grandes almacenamientos, lugar donde se reinicia el ciclo.

Se estima que el 96.5 % del agua del planeta se encuentra en los océanos; del resto, el 1.7 % se encuentra en los hielos polares, otro 1.7 % en manantiales subterráneos y sólo el 0.1 % en los sistemas de agua superficial y atmosférica. Cabe señalar que la evaporación desde la superficie terrestre consume el 61 % de la precipitación total, el 39 % restante

conforma el escurrimiento hacia los océanos, principalmente como agua superficial (Mijares, 2001).

2.3. Precipitación

Se le llama precipitación al agua que llega a la superficie terrestre proveniente de la atmósfera y se presenta en forma de lluvia, granizo o nieve. Existen tres tipos de precipitación que son generados debido al mecanismo que provoca el levantamiento del aire húmedo, estos son:

1. Precipitación Convectiva: Se produce en zonas donde la velocidad del viento es pequeña y la radiación solar muy intensa, esta precipitación afecta áreas reducidas que son del orden de 25 a 50 km².
2. Precipitación Ciclónica: Está asociada al paso de ciclones y afecta zonas muy extensas.
3. Precipitación Orográfica: Se debe a la presencia de zonas montañosas en la parte continental. Cuando los vapores cargados de humedad encuentran una zona montañosa bien, pasan de una zona de clima cálido a otra de clima frío, las masas de aire se elevan y se enfrían, condensando la humedad que llevan formando nubosidades que se precipitan cuando desciende la temperatura. (Rosas, 2004)

2.3.1. Medición de la precipitación

La precipitación se mide en altura de lámina de agua y se expresa comúnmente en milímetros. Los aparatos más usuales para realizar la medición son el pluviómetro y el pluviógrafo.

El pluviómetro es un recipiente expuesto a la intemperie y abierto en la parte superior. Consta fundamentalmente de tres partes. Un área de captación, en la parte superior, que se comunica a un recipiente cilíndrico de área menor, a , mediante un embudo. El pluviógrafo consta de un mecanismo adicional para registrar la variación de la precipitación en el tiempo.

La información de precipitación depende de la localización, el tipo de aparato y el acceso al sitio deseado; los errores más frecuentes son por calibración, funcionamiento y observación.(CFE, 1980)

2.4. Escurrimiento

El escurrimiento se puede definir como la porción de la precipitación pluvial que ocurre en una zona o cuenca hidrológica y que circula sobre o debajo de la superficie terrestre y que llega a una corriente para ser drenada hasta la salida de una cuenca o bien alimentar un lago, si se trata de cuencas abiertas o cerradas, respectivamente.

El escurrimiento se inicia sobre el terreno una vez que en la superficie se alcanza un valor de contenido de humedad cercano a la condición de saturación. Posteriormente se iniciará un flujo tanto sobre las laderas, como a través de la matriz de los suelos, de las fracturas de las rocas o por las fronteras entre materiales de distintas características, esto es, un flujo subsuperficial.

Las fuentes principales del escurrimiento en cauces se pueden clasificar en cuatro tipos:

- Precipitación directa sobre el cauce: Es un aporte modesto comparado con los volúmenes asociados a las otras fuentes; esto se debe principalmente a la pequeña superficie que generalmente abarcan los ríos y corrientes.
- Flujo subsuperficial: Los volúmenes asociados a este escurrimiento varían en el tiempo y en el espacio. En la época de estiaje podrán descargar a un ritmo casi constante, formando corrientes perennes. En otros casos sólo aportarán cantidades suficientes para mantener por algunas semanas más, después de las últimas lluvias, el gasto en un cauce, formando así las corrientes intermitentes.
- Flujo Base: Es el aporte de un sistema acuífero somero a un cauce determinado. En el caso en que una parte de la cuenca se encuentre perturbada por alguna obra hidráulica tal como una presa, un sistema de riego, etc., entonces el gasto base corresponderá a los volúmenes asociados con la operación de dichas obras.
- Escurrimiento directo: Es aquel volumen asociado a la precipitación, es decir, el flujo remanente una vez que quedan definidas las primeras tres fuentes.(Peña Bruñol & Jacobo Villa, 2006).

2.4.1. Medición del escurrimiento

La determinación de los niveles que puede alcanzar el agua o las alturas de agua de un río, se deben hacer en una sección determinada, y esa sección debe ser fija, inalterable en el tiempo, para que las mediciones de alturas de agua se puedan relacionar en el tiempo. Las alturas de agua de un río se hacen en estaciones hidrométricas, y todas las mediciones de

alturas de agua, medidas en metros y centímetros, deben referirse a un cero (0), que debe ser el nivel mínimo que tiene el agua en una sección, o aquel nivel debajo del cual no existe escurrimiento en ese río.

La altura de agua se mide con escalas hidrométricas o limnímetros. Son reglas graduadas en metros, decímetros y centímetros, que deben colocarse en un lugar visible para el observador, en un solo tramo si el río lo permite, o en tramos escalonados hacia fuera del centro del cauce, de modo de medir con precisión los valores mínimos y máximos.

Las lecturas de las escalas hidrométricas deben realizarse con una frecuencia acorde a la manifestación de las variaciones de alturas del río, con frecuencia de horas o días: En ríos localizados en ambientes de montaña deben realizarse mediciones frecuentes para poder captar el paso de las crecidas, no así en ríos de llanura donde los movimientos de elevación o descenso de las aguas son lentos y previsibles.

En algunas secciones hidrométricas no se puede acceder fácilmente para su lectura o no se puede estar todo el tiempo de manifestación de una crecida. En esos casos se instalan limnógrafos, que registran en un papel las oscilaciones de altura de agua. Contienen una boya que actúa como flotador en el agua, un cable que llega hasta el equipo registrador y un contrapeso para equilibrar el movimiento de la boya. El equipo registrador tiene un tambor o cilindro donde se enrolla una faja de papel, y una aguja con tinta, que va marcando dichas oscilaciones, con un mecanismo de relojería que mueve el tambor. Periódicamente, cada día, 7, 15 o 30 días, se saca la faja marcada y se coloca una nueva, dependiendo de las variaciones de altura y de la accesibilidad al lugar de medición.(Heras, 1970)

2.5. Evaporación

Los dos factores principales que influyen en la evaporación desde una superficie abierta de agua son el suministro de energía para proveer el calor latente de vaporización, y la habilidad para transportar el vapor fuera de la superficie de evaporación. La radiación solar es la principal fuente de energía calórica. La habilidad de transporte del vapor fuera de la superficie de evaporación depende de la velocidad del viento sobre la superficie y del gradiente de humedad específica en el aire por encima de ella. (Chow, 1994).

2.5.1. Medición de la evaporación

Las unidades de medida de la evaporación son los mm de altura de agua evaporada (mm), lógicamente referida a un determinado periodo o unidad de tiempo.

La instrumentación utilizada para medir la evaporación depende de si el agua se encuentra como superficie libre o impregnando el suelo. Para medir la evaporación desde una superficie de agua libre, se utilizan bien los estanques de evaporación o bien los evaporímetros tipo Piché:

- Los tanques de evaporación: Son depósitos de dimensiones conocidas en los que se determina la evaporación que se produce controlando los parámetros meteorológicos ya que la evaporación varía en función de ellos.
- El evaporímetro de Piché está formado por un tubo graduado de 1 cm de diámetro, abierto por un extremo que se cubre con un disco de papel de filtro.
- Para los suelos sin vegetación se utiliza el lisímetro, o bien se construyen parcelas experimentales. Esta instrumentación es aplicable también, para el cálculo en suelos

con vegetación: El lisímetro es un instrumento de forma paralelepípeda con una superficie de unos 8 m² y unos 2 m de altura de material impermeable y no cubierto. (Custodia Gimena, Llamas Madurga, & Sahuquillo Herraiz, 1986).

2.6. Temperatura

Es el grado relativo de calor o frío que tiene un cuerpo, causando diferentes efectos como respuesta a la variabilidad térmica presentada.

2.6.1. Medición de temperatura

Todos los instrumentos de medición de temperatura, cualquiera que fuese su naturaleza dan la misma lectura en cero por ciento (0%) y 100%, si se calibra adecuadamente, pero en otros puntos generalmente la lectura no corresponderá porque las propiedades de expansión de los líquidos varían, en este caso se hace una elección arbitraria y, para muchos fines será totalmente satisfactoria.

Se han dividido los elementos primarios de medición de temperatura en 3 tipos:

- Termómetros Transductores que convierten la temperatura en movimiento.
- Sistemas termales Transductores que convierten la temperatura en presión (y después en movimiento).
- Termoeléctricos Transductores que convierten la temperatura en energía eléctrica (y mediante un circuito en movimiento).(Galvez, 2011).

2.7. Hidrograma

El hidrograma es una representación gráfica o tabular de la variación en el tiempo de los gastos que escurren por un cauce. El gasto (Q) se define como el volumen de escurrimiento por unidad de tiempo (m^3/s) que escurre por un cauce.

El hidrograma se define para una sección transversal de un río y si los valores obtenidos se grafican contra el tiempo se obtendrá una representación gráfica.

Los elementos fundamentales del hidrograma son: el gasto antecedente; la rama ascendente; la cresta o pico; la rama descendente; la curva de recesión; y el gasto base. A continuación, se define cada uno de ellos.

- El gasto antecedente: Es el valor donde tiene inicio la rama ascendente; esto es, cuando la condición de saturación en una zona de la superficie de la cuenca es tal que cualquier evento de precipitación propiciará el escurrimiento directo.
- La rama ascendente. Es aquella parte del hidrograma que muestra una fuerte pendiente positiva, uniendo el punto asociado al gasto antecedente con el segmento correspondiente a la cresta o pico del escurrimiento.
- La cresta o pico: Es el valor máximo del escurrimiento y en ocasiones la rama ascendente se une en un sólo punto, el gasto pico, con la rama descendente; en otras se presenta un cambio notorio en la pendiente del hidrograma antes de alcanzar el gasto pico, es decir, aun cuando se trata de una pendiente positiva, su valor es mucho menor al de la rama ascendente antes del gasto pico.
- La rama descendente: Se inicia cuando se presenta el gasto pico y puede ser que al comienzo el descenso sea lento, mostrando pendientes relativamente pequeñas;

posteriormente el descenso será franco y la pendiente aumentará considerablemente hasta que algún otro evento de escurrimiento tenga lugar.

- La curva de recesión: Es el resultado de aportes de otros sistemas con otras características, y que son notorios después del escurrimiento directo.
- El gasto base: Es el valor casi constante al cual tiende la curva de recesión. Generalmente se asocia con el aporte del agua subterránea; sin embargo, como se mencionó anteriormente, si la cuenca ha sido alterada en su funcionamiento hidrológico por alguna obra de control, entonces el flujo base tendrá su origen en la operación de los sistemas hidráulicos existentes (Peña Bruñol & Jacobo Villa, 2006).

2.8. Gasto de diseño

Se le llama gasto de diseño al gasto máximo que puede manejar o conducir una corriente natural u obra hidráulica sin que ocurran daños.

La determinación del gasto máximo probable debe basarse en un estudio del potencial de las tormentas, del escurrimiento y de la distribución de este en relación con las características físicas de la cuenca.

Para la determinación de los gastos, deben reunirse los datos concernientes a los factores que se presentan en cada emplazamiento para la presa, estos factores son:

- Localización geográfica: El potencial de los gastos varía mucho entre las subdivisiones geográficas debido a las diferencias de la topografía, geología y fuentes de humedad.

- Área de drenaje. Se debe tener un mapa preciso sobre el área del emplazamiento de la presa y de la cuenca correspondiente.
- Suelo y cubierta vegetal: El tipo de suelo y de cubierta vegetal de una cuenca influye en el potencial de escurrimiento.
- Distribución del escurrimiento: En este factor el hidrograma unitario ha demostrado ser un instrumento eficaz.(Peña Bruñol & Jacobo Villa, 2006).

2.9. Embalse

Los embalses, almacenamientos, azudes o reservorios, son los vasos que se cierran mediante una represa, con el objeto de recoger las aguas de la cuenca, en la época de lluvias para ser soltadas en las épocas de sequías.

Son volúmenes de agua retenidos en un vaso topográfico natural o artificial gracias a la realización de obras hidráulicas. (Perez Campomanes, 2016).

2.10. Generación de embalses

2.10.1. Embalses naturales

Derrumbe de laderas: En este caso se trata de embalses totalmente incontrolados, que generalmente tienen una vida corta, días, semanas o hasta meses. Al llenarse el embalse con los aportes del río o arroyo, se provocan filtraciones a través de la masa de tierra no compactada, y vertidos por el punto más bajo de la corona, que llevan a la ruptura más o menos rápida y abrupta de la presa, pudiendo causar grandes daños a las poblaciones y áreas cultivadas situadas aguas abajo. (Ainzúa, 2007).

2.10.2. Embalses artificiales

Los embalses artificiales son aquellos generados al construir una presa en el cauce de un río y pueden tener la finalidad de:

- Regular el caudal de un río o arroyo, almacenando el agua de los períodos húmedos para utilizarlos durante los períodos más secos para el riego, para el abastecimiento de agua potable, para la generación de energía eléctrica, para permitir la navegación o para diluir contaminantes.
- Contener los caudales extremos de las avenidas o crecidas (laminación de avenidas).
- Crear una diferencia de nivel para generar energía eléctrica, mediante una central hidroeléctrica. (Ainzúa, 2007).

2.11. Zonas de un embalse

Según Roldán Pérez & Ramírez Restrepo (2008), un embalse tiene una zonificación horizontal y se divide en 3 zonas, las mismas que presentan características independientes.

2.11.1. Zona ribarina o cola del embalse

Esta zona contiene restos vegetales entremezclados con capas de sedimentos elásticos, es decir, a partir del depósito o roca formada por los fragmentos preexistentes. En ella, la velocidad del flujo disminuye rápidamente, sedimentándose partículas de arena y limo gruesas, al igual que una porción del material orgánico particulado. Aunque la respiración puede ser alta, la zona ribarina es por lo general poco profunda y bien mezclada, en

consecuencia, aeróbica. La velocidad y la turbulencia del río disminuidas en esta zona, no mantienen por mucho tiempo las algas en suspensión, y la alta turbidez minimiza la penetración lumínica, por lo que la fotosíntesis debe ser baja. Estas algas son generalmente **diatomeas** de pared gruesa provenientes del **perifiton** del río, que resisten la alta abrasión durante el transporte por él, pero que se hunden rápidamente en un régimen de baja energía. (Ver Figura 1).

2.11.2. Zona de transición o zona media del embalse

En esta área se sedimentan arcillas y limos de tamaño grueso y medio, y materia orgánica particulada. Es una zona donde impera la **anoxia** (falta o disminución de oxígeno), por el procesamiento biológico de materia orgánica particulada fina que puede agotar rápidamente el oxígeno **hipolimnético** (referente a la parte del lago situado en el hipolimnion, constituido por agua estancada y con una temperatura esencialmente uniforme). Estas condiciones: aceleran la desnitrificación y la resolubilización del fósforo, el manganeso y el hierro absorbidos al material particulado sedimentado, y la liberación del H₂S a la columna de agua. Una de las principales características de esta zona es su dinámica (Thornton *et al.*, 1990) (Ver Figura 1).

2.11.3. Zona lacustre o zona de presa

Es la más profunda del embalse, con características similares a la de un lago. En ella predomina el plancton, disminuye la sedimentación del material inorgánico, la penetración

de luz es suficiente para promover la producción primaria. Existe en esta zona limitación potencial de nutrientes y la producción de materia orgánica excede el procesamiento de la misma dentro de la zona de mezcla. (Ver Figura 1)

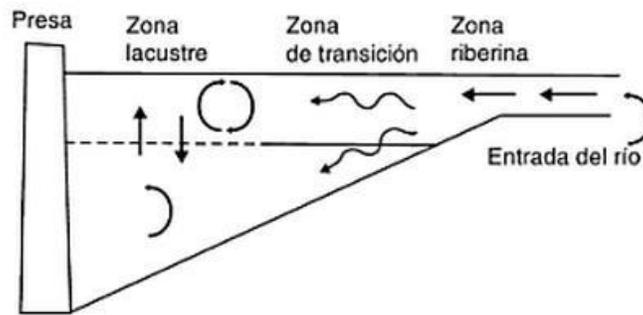


Figura 1: Zonas de un embalse
Fuente: Fundamentos de la limnología tropical

2.12. Estructuras que conforman los embalses

Todo embalse consta de las siguientes estructuras hidráulicas básicas (Ver Figura 2):

- La presa.
- El vertedero o aliviadero.
- Las obras de toma.

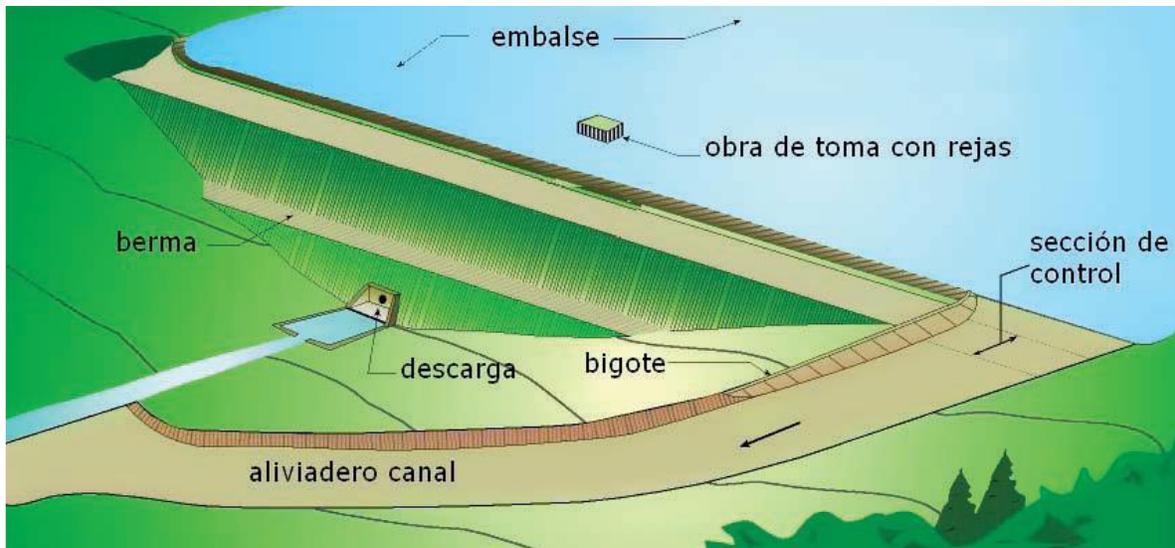


Figura 2. Elementos constitutivos de un embalse.
 Fuente: Diseño y Construcción de pequeñas presas, 2011.

2.12.1. Presas

La presa, dique o represa es una pared que se coloca en un sitio determinado del cauce de una corriente natural con el objeto de almacenar parte del caudal que transporta la corriente (Betancourt, 2014). La pared debe ser diseñada para que soporte las fuerzas que se generan por la presión del agua, y para que impida filtraciones a lo largo de su estructura y en las superficies de contacto entre la estructura y el terreno natural adyacente. Además, la presa debe contar con obras complementarias que permitan el paso del agua que no se embalsa y con estructuras de toma para captar y entregar el agua embalsada a los usuarios del sistema.

2.12.2. Aliviadero o vertedor

El aliviadero o estructura de alivio o vertedor, descarga los excesos que llegan al embalse, los cuales no se desean almacenar. Su característica más importante es la de evacuar con facilidad las máximas crecientes que llegan al vaso de almacenamiento. Su insuficiencia provoca el desborde del agua por encima de la cresta de la presa y el posible colapso de esta estructura sobre todo si se trata de una presa de tierra o enrocado. (Fattorelli & Fernandez, 2011).

Según la Bureau Of Reclamation, 1970: La función de los vertederos en las presas de almacenamiento y en las reguladoras es dejar escapar el agua excedente o de avenidas que no cabe en el espacio destinado para almacenamiento, y en las presas derivadoras dejar pasar los excedentes que no se envían al sistema de derivación.

Ordinariamente los volúmenes en exceso se toman de la parte superior del embalse creado por la presa y se conducen por un conducto artificial de nuevo al río o algún canal de drenaje natural.

2.13. Uso de los embalses

Básicamente un embalse creado por una presa que interrumpe el cauce natural de un río, pone a disposición del operador del embalse: un volumen de almacenamiento potencial que puede ser utilizado para múltiples fines, algunos de ellos complementarios y otros conflictivos entre sí; así como también pone a disposición del operador del embalse, un potencial energético derivado de la elevación del nivel del agua.

Se pueden distinguir los usos que para su maximización requieren que el embalse esté lo más lleno posible, garantizando un caudal regularizado mayor. Estos usos son:

La generación de energía eléctrica: Protección y suministro de energía para usos domésticos e industriales.

El Riego: Usos domésticos e industriales, obteniéndose como beneficio: Incremento de la producción agropecuaria.

Abastecimiento de agua potable o industrial: Aumento de bienestar de la población. Mejoramiento de la piscicultura para usos industriales. Mejoramiento de la ecología vegetal y animal.

Control de sedimentos: Pequeños embalses para control de sedimentos a otros embalses o a corrientes de agua. Control de erosión.

Navegación: Facilidades de transporte por vía fluvial, permitiendo la navegación entre poblaciones. (Ainzúa, 2007)

2.14. Ventajas y desventajas de los embalses

2.14.1. Ventajas de los embalses

- Mejoramiento en el suministro de agua a núcleos urbanos en épocas de sequía.
- Desarrollo de la industria pesquera.

- Incremento de las posibilidades de recreación.
- Mantenimiento de reservas de agua para diferentes usos.
- Incremento de vías navegables y disminución de distancias para navegación.
- Control de crecientes de los ríos y daños causados por inundaciones.
- Mejoramiento de condiciones ambientales y paisajísticas.

2.14.2. Desventajas de los embalses

- Pérdidas en la actividad agroindustrial por inundación de zonas con alto índice de desarrollo.
- Alteración de los hábitats y los paisajes fluviales.
- Alteración de las zonas bajas que perturba el ciclo natural de peces y otros organismos acuáticos (alteración de corredores ecológicos naturales)
- Desplazamiento de comunidades enteras.
- Inestabilidad en los taludes que se encuentran cerca al valle, generando deslizamientos de material en algunos casos.
- Posible incremento de la actividad sísmica, especialmente durante el llenado de embalses muy grandes.

2.15. Volúmenes característicos de un embalse

Volumen muerto: Está ubicado por debajo del nivel muerto del embalse (NME) y es donde se acumularán los sedimentos durante la vida útil del embalse. Debe exceder en

capacidad al volumen de sedimentos calculado durante la vida útil con el fin de que el embalse los pueda contener. Su determinación es muy compleja, sobre todo si el embalse es de propósito múltiple (caso en que debe tenerse en cuenta la carga de agua sobre las turbinas, condiciones de navegación aguas arriba, altura de comando sobre las tierras de riego, etc.).

Volumen útil: Es el volumen de almacenamiento ubicado entre el nivel mínimo de operación del embalse (NMOE) y el nivel de aguas normales (NNE).

Volumen de laminación: Es el volumen, como su nombre indica, que se utiliza para reducir el caudal vertido en las avenidas, para limitar los daños aguas abajo. (Guevara, 2000).

2.16. Caudales característicos de un embalse

Caudal firme: Es el caudal máximo que se puede retirar del embalse en un período crítico. Si el embalse ha sido dimensionado para compensar los caudales a lo largo de un año hidrológico, generalmente se considera como período crítico al año hidrológico en el cual se ha registrado el volumen aportado mínimo. Sin embargo, existen otras definiciones para el período crítico también aceptadas, como, por ejemplo, el volumen anual de aporte hídrico superado en el 75 % de los años, que es una condición menos crítica que la anterior.

Caudal regularizado: Es el caudal que se puede retirar del embalse durante todo el año hidrológico, asociado a una probabilidad.

2.17. Localización de la cuenca

La cuenca del río Boba está localizada en la zona atlántica, al nordeste de la República Dominicana, específicamente en las coordenadas de nacimiento 2150803 N y 358022 E, y 2152259 N y 408208 E en la desembocadura del mismo.

El proyecto está localizado en la región Cibao Nordeste, provincia María Trinidad Sánchez, municipio de Nagua. Desde el punto de vista de la administración de riego, el proyecto se sitúa en el Distrito de Riego del Bajo Yuna. El embalse estará ubicado poco después del poblado de Rancho Abajo, inmediatamente aguas abajo de la confluencia con el arroyo Guaigüi.

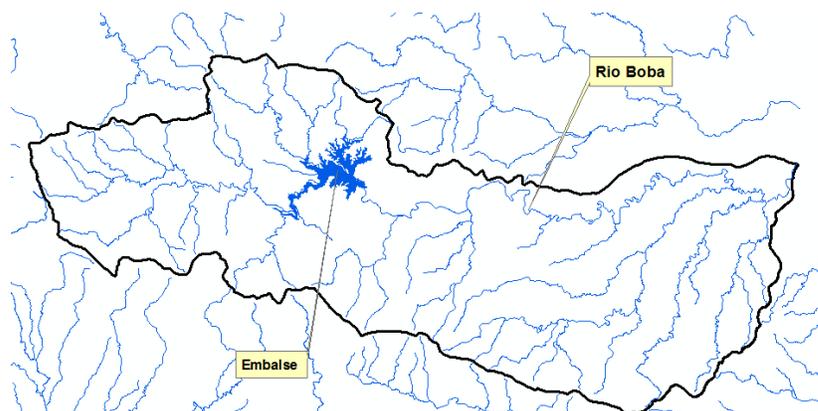


Figura 3. Localización del embalse sobre el río Boba.

Fuente: Propia.

2.18. Geometría de la cuenca

La cuenca del río Boba cuenta con un área de 630.72 km² y un perímetro de 144.41 km en su extensión. El cauce principal de la cuenca tiene una longitud total de 92.48 km,

En el recorrido desde su nacimiento hasta su desembocadura alcanza una longitud total de cauce principal de unos 92.48 Km. La delimitación del parte aguas tiene una longitud o perímetro de 144.41 km, formando un área cerrada de unos 630.72 km².

2.20. Sub-cuencas del río Boba

La cuenca del río Boba posee 5 sub-cuencas donde la acción tributaria en la cuenca es de vital importancia y son las cuencas de los ríos: Canete, Venú, Riote, arroyo Al Medio y arroyo Grande.

A continuación, una breve descripción de los ríos de mayor acción en la cuenca del río Boba:

El río Canete nace en el lugar denominado La Catalina a una altura aproximada a los 480 m.s.n.m. las coordenadas de nacimiento y desembocadura son 2147681N, 359447E y 2151038N, 367909E, respectivamente. El mismo alcanza una longitud hasta su desembocadura al río Boba de 13.66 km, con una elevación de 280 m.s.n.m próximo al Cruce de Los Guineos.

El río Venú nace en el lugar denominado El Higüero a una altura aproximada a los 500 m.s.n.m. las coordenadas de nacimiento y desembocadura son 2157944N, 369474E y 2151797N, 377167E, respectivamente. El mismo alcanza una longitud hasta su desembocadura al río Boba de 15.72 km, con una elevación de 160 m.s.n.m próximo al poblado de Rancho Abajo.

El río Riote nace en el firme Quita Espuela a una altura aproximada a los 640 m.s.n.m. las coordenadas de nacimiento y desembocadura son 2139781N, 384859E y 2150478N, 404280E, respectivamente. El mismo alcanza una longitud hasta su desembocadura al río

Boba de 19.10 km, con una elevación de 10 m.s.n.m próximo al poblado denominado La Lometa.

El arroyo Al Medio nace en la loma Guaconejo a una altura aproximada a los 400 m.s.n.m. las coordenadas de nacimiento y desembocadura son 2136048N, 398298E y 2149705N, 406051E respectivamente. El mismo alcanza una longitud hasta su desembocadura al río Boba de 27.54 km, con una elevación de 10 m.s.n.m próximo al poblado El Drago.

El arroyo Grande nace en la loma El Alto del Rancho a una altura aproximada a los 340 m.s.n.m. las coordenadas de nacimiento y desembocadura son 2137049N, 401515E y 2149558N, 406210E respectivamente. El mismo alcanza una longitud hasta su desembocadura al río Boba de 20.47 km, con una elevación de 10 m.s.n.m próximo al poblado El Drago.



Figura 5. Mapa de sub-cuencas del río Boba

Fuente: Departamento de hidrología (INDRHI)

2.21. Parámetros climáticos

En la cuenca del río Boba existe una estación climatológica manejada por el INDRHI que lleva por nombre estación climatológica Los Jengibres, la cual está localizada en la coordenada 2149752 N y 390063 E, la misma cuenta con un registro de 35 años de datos, desde el año 1974 hasta la fecha. Se ha seleccionado esta estación por ser la más representativa de esta zona. Los valores medios mensuales de los diferentes parámetros climáticos, presentan algunas interrupciones de un mes hasta un año.

2.22. Precipitación

La precipitación promedio anual en el área de influencia del proyecto es de unos 2,387.9 mm medidos en la estación pluviométrica Los Jengibres. Las mayores precipitaciones se producen en el mes de noviembre, donde se registra una precipitación alrededor del 15 % del total anual. Según los datos de la estación, existen dos periodos en los que la precipitación disminuye con relación a los demás meses.

Desde febrero hasta abril se registra el primer período de baja en las precipitaciones produciéndose solo un 20% del total anual en este periodo. El segundo periodo de baja corresponde a los meses desde junio hasta agosto, donde se presenta un 25 % del total anual de las precipitaciones. (Ver Cuadro No.3).

Cuadro No.3. Promedios mensuales de precipitación en mm en estación Los Jengibres

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic	MedioAnual
Prec.	189	139.3	146.9	202.6	274.9	126.3	169.0	158.3	148.7	261	359.0	212.9	2,387.9

Fuente: Departamento de Hidrología del INDRHI.

2.23. Evaporación

La evaporación promedio anual en la zona de estudio es de unos 71.2 mm, registrados en la estación climática Los Jengibres. Se produce un incremento en la evaporación mensual en los meses desde marzo hasta octubre, mientras que se produce un descenso en la evaporación mensual entre los meses desde noviembre hasta febrero. (Ver Cuadro No.4).

Cuadro No. 4. Promedios mensuales de evaporación en mm en estación Los Jengibres

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic	MedioAnual
Prec.	78.6	87.5	124.4	128.4	129.4	134.5	137.0	129.8	122.5	111.9	84.6	74.1	2,387.9

Fuente: Departamento de Hidrología del INDRHI.

2.24. Temperatura

El clima en el área de estudio corresponde a Bosque Húmedo. La temperatura media anual en Nagua es de 26.1 °C. El mes más caluroso del año con un promedio de 27.3 °C es septiembre, mientras que el mes más frío del año con un promedio de 24.3 °C es Enero (Ver Cuadro No.5).

Cuadro No.5. Promedios mensuales de la temperatura en °C en estación Los Jengibres

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Sept	Oct	Nov	Dic	MedioAnual
Prec.	22.9	23.0	23.4	24.2	25.2	26.1	26.2	26.1	25.8	24.7	23.3	26.1

Fuente: Departamento de Hidrología del INDRHI

En el siguiente gráfico 1 se puede observar que los valores máximos de precipitación se producen en los meses de noviembre y mayo. Los periodos más altos de temperatura se sitúan entre los meses de junio y septiembre, mientras que las más bajas se ven en el mes de diciembre.

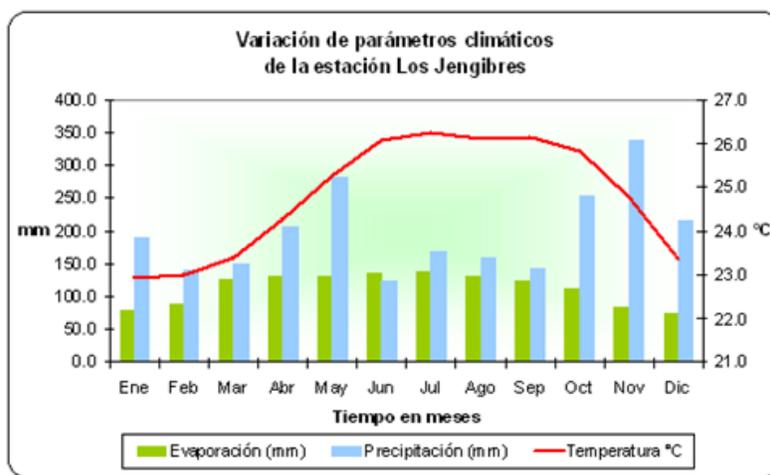


Grafico 1. Parámetros climáticos estación Los Jengibres
Fuente: Departamento de hidrología (INDRHI)

2.25. Geología de la cuenca del río Boba

La zona de estudio está ubicada en la Unidad Hidrogeológica de la Cordillera Septentrional, la cual presenta una gran complejidad desde el punto de vista geológico y consecuentemente también en el aspecto hidrogeológico.

La mayor parte de la cordillera está formada de rocas impermeables o no acuíferas, que incluyen toda la serie magmática-metamórfica y gran parte de la serie sedimentaria como podemos observar en el corte geológico mostrado a continuación.

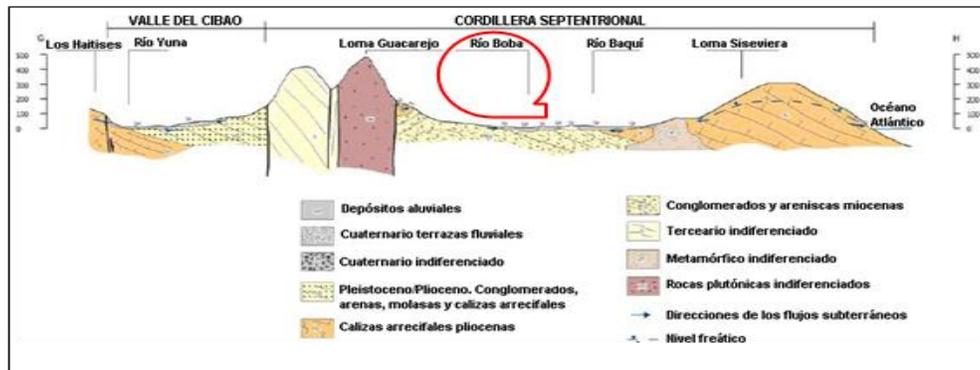


Figura 6. Corte geológico Cordillera Septentrional.
Fuente: Estudio Hidrogeológico Nacional Fase II, Eptisa 2004.

En la cuenca del río Boba se localizan varios pantanos, así como gran número de lagunillas que son dolinas pequeñas que se abren en la llanura costera, asentada sobre una base de calizas. Más al norte, se sitúa un gran estuario abandonado y como continuación del mismo, la Gran Laguna. Todos estos fenómenos son alimentados por aguas subterráneas someras que permiten, entre otras cosas, el desarrollo de manglares.

2.26. Suelos cuenca del río Boba

Suelos tipo A, corresponde al tipo de suelo que ofrece menor escorrentía. Los suelos tienen mayor permeabilidad, incluso cuando están saturados. Comprenden los terrenos profundos, sueltos, con predominio de arena o grava y con muy poco limo o arcilla.

Suelos tipo B, de la clasificación hidrológica de los suelos, de moderada permeabilidad cuando están saturados, comprendiendo los terrenos arenosos menos

profundos que los del grupo A, aquellos otros de textura franco-arenosa de mediana profundidad y los francos profundos.

Suelos tipo C. Suelos que tienen capacidades de infiltración bajas cuando están completamente húmedas principalmente de suelos que contienen una capa que impide el movimiento hacia abajo del agua o suelos con textura fina o moderadamente fina, estos suelos tienen baja transmisión de agua.((INDRHI))



Figura 7. Clasificación de suelos de la cuenca del río Boba.

Fuente: Estudio de inundación en la cuenca del río Boba, Sandra José y Yenny Rodríguez, 2013.

Capítulo 3: Diseño Metodológico

3.1. Enfoque de la investigación

Según Sampieri, el enfoque de la investigación puede ser cualitativo, cuantitativo y mixto.

El **enfoque cuantitativo** es secuencial y probatorio. Cada etapa precede a la siguiente y no se puede “brincar o eludir” pasos, el orden es riguroso, aunque, desde luego, podemos redefinir alguna fase. Parte de una idea, que va acotándose y, una vez delimitada, se derivan objetivos y preguntas de investigación, se revisa la literatura y se construye un marco o una perspectiva teórica. De las preguntas se establecen hipótesis y determinan variables; se desarrolla un plan para probarlas (diseño); se miden las variables en un determinado contexto; se analizan las mediciones obtenidas (con frecuencia utilizando métodos estadísticos), y se establece una serie de conclusiones respecto de la(s) hipótesis. (Sampieri, 2010)

Esta investigación requiere el empleo de datos numéricos correspondientes al lugar de diseño, obedece a un procedimiento secuencial y que por tanto requiere precisión en los resultados obtenidos podemos concluir en que esta investigación es de enfoque cuantitativo.

3.2. Tipo de investigación

Los **estudios descriptivos** buscan especificar las propiedades, las características y los perfiles de personas, grupos, comunidades, procesos, objetos o cualquier otro fenómeno que se someta a un análisis. Es decir, únicamente pretenden medir o recoger información de manera independiente o conjunta sobre los conceptos o las variables a las que se refieren, esto es, su objetivo no es indicar cómo se relacionan éstas.(Sampieri, 2010)

Según el objetivo planteado en este trabajo y lo anteriormente expuesto, esta investigación es de carácter descriptivo. Debido a que es un proyecto de diseño es necesario medir las variables que se requieren para poder ejecutar el diseño y describir la zona de estudio.

3.3. Procedimiento de la investigación

En el presente estudio se obtuvo la información sobre la cuenca y la hidrología del río Boba por medio del departamento de Hidrología del Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INDRHI). Como complemento se consultaron libros de hidrología con el fin de ampliar el conocimiento sobre los embalses y sus componentes.

En la etapa de diseño se integró una nueva metodología, la cual utiliza imágenes satelitales georreferenciadas, programas como ArcMap, para generar los modelos digitales de profundidad (MDP) y luego se procede a calcular el volumen embalsado para luego asignar los porcentajes a los distintos volúmenes que conforman el total embalsado.

3.4. Método de investigación

Metodología Analítica: Toda la teoría, hechos y acontecimientos serán analizados técnicamente de tal forma que pueda entenderse estructurada coyunturalmente todos los aspectos relacionados con esta investigación.

Según lo visto en la definición se puede afirmar que nuestra investigación es analítica porque es necesario evaluar los parámetros hidrológicos que llevan a un diseño preciso del embalse.

3.5. Técnica de investigación

Los recursos o técnicas empleadas fueron:

Revisión documental de los archivos que fueron facilitados por el INDRHI y los libros de hidrología con el propósito de que sirvieran de apoyo del marco teórico y contextual.

Técnicas computacionales para la generación de imágenes satelitales Georreferenciadas y la del Modelo Digital De Profundidades (MDP), entre otros.

Capítulo 4: Diseño Hidrológico

4.1. Antigua metodología para diseño de embalses

Consiste en la determinación del tamaño del almacenamiento, incluyendo el volumen muerto, el útil, de crecidas, las pérdidas, y el borde libre mediante un número de fórmulas; así como también del diseño de las obras necesarias para su óptimo mantenimiento (vertedero o aliviadero, obras de toma, y orificios de purga).

4.2. Altura de la presa

La altura de la presa, puede estar implícitamente controlada por la topografía y las condiciones geológicas del sitio de cierre del río, las cuales a su vez definen el tipo de presa: presa de tierra, de gravedad, de arco, etc.

Los datos básicos necesarios que se deben tener en cuenta, una vez seleccionado el sitio, para poder calcular la altura de una presa son (Fattorelli&Fernandez, 2011):

- Mapas topográficos del vaso que permitan determinar las relaciones de cota-volumen y cota-área. Para vasos grandes la escala adecuada puede ser 1:25.000 y 1:10.000 o menor para vasos medianos o pequeños. Igualmente, las curvas de nivel deberán tener un espaciamiento tal que permita obtener mapas de los sectores del vaso para alturas sucesivas con buena precisión.
- Datos de caudales o volúmenes anuales y mensuales de series históricas o generadas.
- Datos de aporte de sedimentos en el río.
- Datos de demandas estimadas a nivel anual y mensual.

- Datos climáticos de lluvias (si son importantes), evaporación y vientos.
- Datos de crecientes.
- Curvas de superficie libre del río aguas abajo de la presa para diferentes descargas y áreas inundables correspondientes a las mismas.

En la Figura 8 se indican las franjas imaginarias en que se divide una presa, con el fin de ordenar su diseño hidrológico, para el cálculo de la altura de la presa.

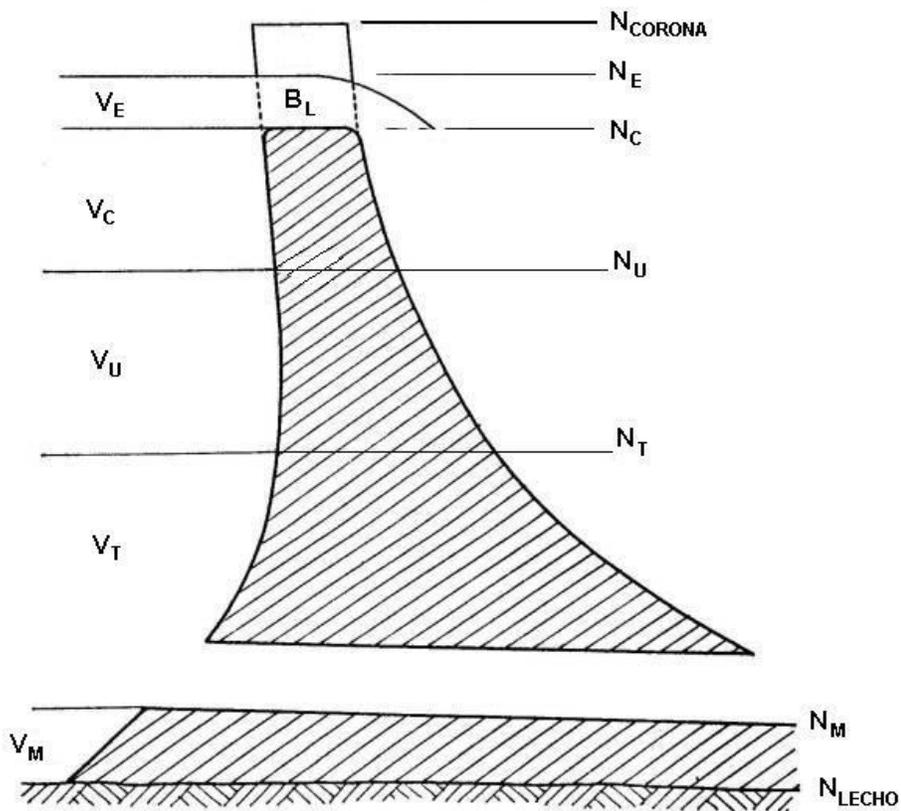


Figura 8. Franjas imaginarias para el cálculo de la altura de una presa de embalse.
Fuente. (Fattorelli&Fernández, 2011)

NIVEL (m)	VOLUMEN (m ³)
Lecho del río (N _{LECHO})	Vol. Muerto (V _M)
Base de las tomas (N _M)	Vol. Turbinas (V _T)
Nivel mínimo admisible (N _r)	Vol. Útil (V _U)
Nivel mínimo normal (N _U)	Vol. Crecida (V _C)
Nivel máximo normal (N _C)	Vol. Extraordinario (V _E)
Nivel máx. extraordinario (N _E)	
Nivel de coronamiento (N _C)	Vacio

Leyenda figura 8

Fuente: Tesis de " Diseño de embalse teniendo en consideración los impactos ambientales ". Autor: Jhon Córdova Carmen

4.3. Cálculo del volumen muerto del embalse (VM)

El volumen muerto es aquel que está conformado por el volumen de sedimentos o azolves.

Los factores principales que afectan el transporte de sedimentos a un embalse son:

- a. Características hidráulicas del cauce.
- b. Características de los materiales del cauce.
- c. Factores hidrometeorológicos que afectan el proceso erosivo.
- d. Factores topográficos, especialmente importantes en zonas de montaña que en combinación con lluvias copiosas generan crecientes rápidos con alto potencial de arrastre.
- g. Mal manejo de materiales sobrantes de obras de ingeniería civil.

El sedimento en suspensión es el que interesa porque el arrastre de fondo en su mayoría se deposita en la cola del embalse. El sedimento en suspensión se deposita en el embalse en una proporción diferente según sean las características del sedimento, las normas de operación y la relación entre la descarga del río y el volumen del embalse.

Las gravas finas, arenas, limos y arcillas constituyen el mayor porcentaje de sedimentos que contribuyen a la formación del embalse muerto. El mayor porcentaje de aporte de sedimentos se da cuando se presenta una creciente en el río por lo que los caudales máximos son los que se consideran para la determinación del volumen muerto. Dos formas para calcular el volumen muerto se van a considerar a continuación, teniendo en cuenta si se tienen o no información sobre caudal y sedimentos.

Entre las dos formas existentes para calcular el volumen muerto están:

A: Teniendo en cuenta información de caudal y de sedimentos

$$V_M = (CQT/\rho_{bT}) * FC$$

V_M = Volumen muerto.

C = concentración de sedimentos en un intervalo de tiempo, Δt [kg/m³]

Q = caudal máximo mensual [m³/s]

T = vida útil de la obra [años]

ρ_{bT} = Densidad bulk del sedimento al cabo de la vida útil del embalse, peso volumétrico del sedimento [kg/m³]

FC = factor de conversión de unidades 1 año = 31, 536,000 segundos

El volumen muerto se puede calcular: mes a mes o año a año considerando la información hidrológica disponible.

El volumen muerto total en un año se obtiene sumando el volumen muerto obtenido para cada intervalo de tiempo Δt en un año y multiplicándolo por el número de años de vida del embalse.

B. Teniendo en cuenta el volumen útil del embalse

El volumen muerto se puede tomar preliminarmente entre un 8% y un 12 % del volumen útil (Guevara, 2000).

4.4. Cálculo del nivel mínimo para turbinas (NT)

Cuando la presa tiene turbinas existe una altura de carga mínima que asegura el buen funcionamiento de las mismas. Conocido ese valor, en base a las especificaciones de las turbinas a colocar, se calcula con las curvas de superficie libre (perfiles de flujos) del río de aguas abajo de la presa, el nivel que tendrá el mismo para la máxima descarga normal. Esta cota más la altura de carga mínima de las turbinas dará la cota del nivel mínimo a que puede llegar el embalse durante su operación. Este nivel determina en realidad un verdadero volumen muerto adicional que a veces es muy significativo con respecto al volumen total de embalse.

4.5. Cálculo del volumen útil (VU)

Para determinar el volumen útil del embalse se consideran los siguientes criterios:

- Se busca tener el embalse lleno la mayor parte del año.
- El embalse se considera lleno cuando el volumen de almacenamiento es cero y desocupado para un volumen igual al máximo valor absoluto.
- Rebose sólo se presenta cuando el embalse está lleno y cuando el volumen que entra al embalse sea mayor que el volumen que sale del embalse.
- El volumen útil requerido es el mayor valor absoluto de la operación del embalse.
- El período crítico es el número de períodos de tiempo desde que el embalse está lleno hasta que se desocupa.

Dependiendo el tipo de presa que se quiera proyectar, se realiza un tipo de análisis para conocer su volumen útil y su nivel de aguas máximo de operación. Un método para obtener el volumen útil es a partir de la generación de una curva masa comparada con la demanda; otro es el algoritmo de pico secante que calculando la diferencia de los valores máximos de volúmenes almacenados se conoce el volumen útil. (Guevara, 2000).

Las curvas de masa permiten visualizar los períodos secos y los abundantes. Es importante destacar que no siempre resulta sencillo seleccionar el período más crítico, porque frecuentemente una sucesión de períodos moderadamente secos resulta más grave que un sólo período muy seco, pero más corto.

La proyección de la línea de volúmenes de las demandas acumuladas a través de todo el período seco, indica en su máxima separación un valor que leído en la escala de las ordenadas da el volumen de operación necesario para satisfacer la demanda estimada a través de un período seco igual al histórico.

Con el diagrama de Rippl se pueden resolver dos problemas:

a. **Determinar la capacidad de embalse necesaria en un río para diferentes niveles de consumo.** En este caso, se trazan líneas tangentes a la curva de masa siguiendo la pendiente de las diferentes líneas de demandas, desde el punto inicial del período seco hasta la intercepción con la misma, la máxima separación proporciona el valor de V_u .

b. **Para una capacidad dada de embalse determinar la demanda que puede satisfacer.** En ciertos casos, la capacidad del embalse está fijada por razones topográficas, geológicas o constructivas. El procedimiento en este caso, consiste en trazar para los diferentes períodos de sequías líneas de demanda tales que, la máxima separación de la curva de masa, no supere el valor fijado de capacidad del embalse predeterminada.

De todas las líneas trazadas, aquella que tenga la menor pendiente será la que satisface la demanda primaria (caudal firme). Otros niveles de demanda superiores corresponderán a demandas secundarias que implican el riesgo de una determinada posibilidad de sequía. La elección de un determinado riesgo de sequía depende del uso del recurso y por lo tanto, de las consecuencias sociales y económicas que la restricción pueda ocasionar.

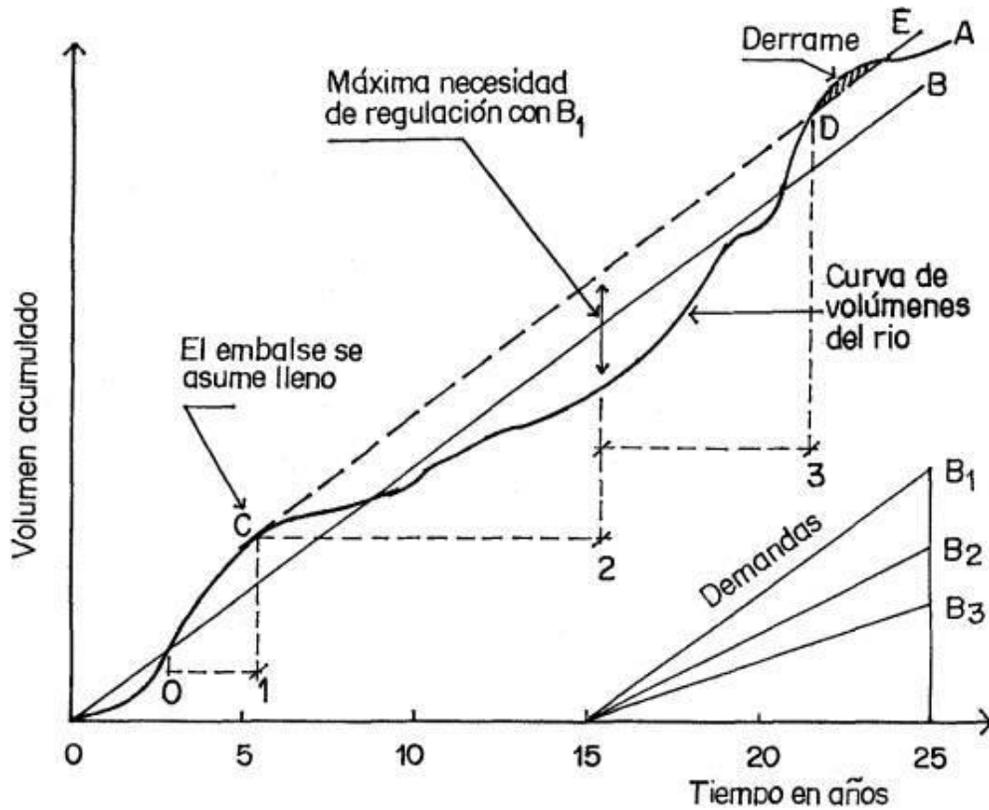


Figura 9. Diagrama de Rippl para calcular la capacidad necesaria de un embalse en un río.

Fuente. (Fattorelli&Fernández, 2011)

En generación eléctrica o abastecimiento a ciudades o industrias, la demanda primaria tiene que tener una confiabilidad no menor del 90%. En el caso de riego, es variable con el tipo de cultivo, pero en general se adoptan niveles de confiabilidad entre el 75% y el 85%.

4.6. Pérdidas de agua en el embalse

4.6.1. Evaporación

Para estimar las pérdidas por evaporación se debe de conocer los requisitos y el tamaño de la superficie libre del embalse. El volumen de agua evaporada del embalse se puede calcular mediante la fórmula:

$$V_{ev} = 10A * E_v * C$$

V_{ev} =volumen de agua evaporada [m³]

A =superficie media del embalse [ha]

$$A = (A_1 + A_2) / 2$$

A_1 = área correspondiente al embalse lleno

A_2 = área correspondiente al embalse vacío

E_v = evaporación promedia [mm/mes]

C = número de meses correspondientes al período crítico contados desde que el embalse está lleno hasta que esté vacío.

Tanto las pérdidas por evaporación como por infiltración se calculan para un período de tiempo igual al del déficit continuo de mayor duración.

4.6.2. Infiltración

Aunque existen fórmulas y métodos matemáticos para el cálculo de la infiltración a través de la presa, fondo y contorno del embalse, la información necesaria no siempre está disponible, por lo que para pequeños almacenamientos, se puede tomar como un porcentaje del volumen útil del embalse así:

$$V_{inf} = C * (\%VU)$$

V_{inf} = volumen de infiltración [m³/mes]

$\%VU$ = porcentaje del volumen útil (Ver Tabla 3).

C = número de meses correspondientes al período crítico contados desde que el embalse está lleno hasta que esté vacío.

Tabla 3. Valores de infiltración mensual.

Suelos Del Embalse Infiltración Mensual (%)

Impermeable	1
Regular impermeabilidad	1.5
Permeabilidad	2 a 5

4.7. Cálculo del volumen de crecidas (VC)

En todos los estudios de embalses se deben hacer análisis hidrológicos de las crecidas del río, ya que el adecuado control de estas contribuye no sólo con la seguridad hacia aguas abajo de la presa, sino a la estabilidad de la misma.

El volumen de crecidas, en los embalses de propósito múltiple, o el volumen total del embalse en aquellas que se construyen sólo para ese fin, tiene como objetivo amortiguar el pico del hidrograma de la creciente, embalsando agua en el momento que se producen los valores máximos de caudal, para luego descargar al río los mismos volúmenes en tiempos más largos (caudales menores).

El volumen de embalse de crecidas puede tener un nivel N_c correspondiente a crecientes hasta un cierto valor de probabilidad de ocurrencia (100 años, por ejemplo) y otro nivel N_E , para las situaciones de crecientes extraordinarias (1000 años o más) que descargan un volumen por encima del vertedero (V_E). Para analizar esta última situación, bastaría repetir el cálculo del tránsito de la creciente partiendo de un valor inicial de embalse lleno al nivel de N_c .

4.8. Cálculo del borde libre (BL)

La presa debe tener una altura superior al nivel máximo que puedan alcanzar las aguas.

Este nivel que no se ocupa con agua, se llama borde libre, evita que por efecto de olas o movimientos en la superficie libre del embalse el agua derrame por encima de la presa. Esta situación sería altamente indeseable principalmente en presas de tierra y material mixto.

En el cálculo del borde libre (BL) intervienen: la acción del viento, la inclinación de la superficie del embalse, el choque de las olas en la presa, revanchas y el asentamiento de la presa.

4.9. Acción del viento

El oleaje en un embalse es causado por el viento y por los movimientos propios del agua. La altura de las olas varía con la magnitud de la velocidad del viento y su persistencia, es decir, el tiempo que el viento se mantiene en una misma dirección a una determinada velocidad.

La acción del viento se considera significativa en embalses muy grandes (mayores de 200 Km²) y debe calcularse. Para embalses pequeños la acción del viento se puede considerar con un factor de seguridad adicional en el borde libre de la presa.

Frecuentemente, el efecto mayor para la formación de olas, se manifiesta si la duración del viento para una determinada dirección, supera los 60 minutos.

Las presas deben tener suficiente borde libre por encima del nivel máximo del embalse para que las ondas no puedan sobrepasar la cresta.

El oleaje causado por el viento se calcula por medio de fórmulas empíricas de las cuales dos ejemplos son:

Fórmula de Diakon:

$$h_0 = 0.0186V^{0.71}F^{0.24}P^{0.54}$$

h_0 = altura de la ola [m]

V = velocidad del viento [m/s]

F = fetch [km]

Fetch = longitud máxima del embalse sobre la que sopla el viento dominante

P = altura de la presa [m]

Fórmula de Stevenson – Molitor:

$$h_0 = 0.0323\sqrt{VF} + 0.76 - 0.272\sqrt{F^4}$$

h_0 = altura de la ola [m]

V = velocidad del viento [km/h]

F = fetch [km] = altura de la ola [m]

V = velocidad del viento [km/h]

F = fetch [km]

Es recomendable calcular la altura de la ola para dos casos:

- a) Considerar la fetch para la dirección del viento dominante.
- b) Considerar la fetch para la dirección del viento no dominante pues esta combinación puede resultar en mayor altura de la ola.

4.10. Altura de trepada de la ola

La ola al chocar contra la cresta de la presa sufre una sobreelevación que debe tenerse en cuenta al determinar el borde libre de la presa. Este efecto se puede considerar incrementando la altura de la ola (Bustamante, 1996):

Altura total de trepada de la ola sobre superficie vertical: $1.3 \cdot h_0$

Altura total de trepada de la ola sobre superficie inclinada: $1.5 \cdot h_0$

4.11. Sobre - elevación de la superficie libre del embalse (“Setup”)

Bajo la acción de vientos continuados en una misma dirección se produce un efecto de “marea” o ascenso de la superficie libre del agua sobre la costa del embalse, orientada de

frente a la dirección del viento. Si ese efecto se produce sobre la presa, este ascenso se manifiesta con una elevación de la superficie del agua sobre la misma.

Este efecto se considera mediante la siguiente expresión USBR (1987):

$$h_2 = V^2 \cdot F / 62000 \cdot h_m$$

Donde:

h_2 = Altura de ascenso del agua [m]

V = Velocidad del viento [km/h]

F = Fetch [km]

h_m = *Volumen embalse / Área*

4.12 Nueva metodología

Generalmente el diseño hidrológico de los embalses comprende la determinación de los distintos volúmenes por medio de una serie de estudios, formulas y análisis de gráficos entre otros, si bien es cierto han resultado satisfactoriamente hasta el momento. Sin embargo, con el pasar de los años han ido surgiendo nuevas metodologías que permiten la integración de nuevas técnicas computacionales que ayudan a agilizar la obtención de la capacidad total del embalse. Como es el caso de la metodología implementada por los doctores Sergio Gustavo Mosa, Miguel A. Boso y el Lic. Virgilio Núñez, titulado "Colmatación de los Embalses de Generación Hidroeléctrica del Noroeste Argentino – Aplicación de Nuevas Metodologías Batimétrica".

Esta metodología se aplicó en embalses de grandes presas ubicados en el noroeste argentino: El cadillar y Escaba, en la provincia Tucumán; Cabra Corral y El Tunal, en Salta;

y Río Hondo, en Santiago del Estero. Cabe destacar que esta metodología proporciona el conocimiento de la variación de la capacidad de los embalses y reconstrucción de las curvas área-volúmenes, información necesaria para la óptima planificación de sus operaciones y el estudio de las características granulométricas de los sedimentos acumulados que aporta información del mecanismo de colmatación que están sufriendo los mismos.

En nuestra investigación no se aplicó la metodología para conocer la colmatación del embalse debido a que es un proyecto a futuro por lo tanto físicamente no existe. Para este caso se emplearon las técnicas utilizadas por los autores para poder conocer la capacidad total de almacenamiento y a partir de éste, poder determinar los volúmenes que lo integran y obtener la altura de la cortina que retendrá el agua.

El programa utilizado **ArcGIS** Es un software de sistema de información geográfica (SIG) utilizado para calcular la capacidad total del embalse mediante imágenes satelitales georreferenciadas.

4.13. Pasos de aplicación de metodología nueva usando software ArcGIS .

1. Descarga de imagen satelital del área de estudio desde la plataforma de GLOVIS (www.glovis.usgs.gov).
2. Conocido el espejo de agua (información suministrada por el Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INDRHI), en formato SHP (shapefile), se superpuso con la imagen satelital mencionada para delimitar el área de interés.

3. Generación de curvas de nivel de 10 metros para conocer la variación de alturas dentro del área objeto de estudio mediante el uso, aplicando la opción Contour 3D Analyst del menú.
4. Generación de un Triangulated Irregular Network (TIN) a fin de interpolar los puntos desconocidos en el embalse.
5. A partir del TIN generado y con el perímetro obtenido de la imagen satelital se generó el Modelo de Profundidades con una resolución espacial de 30m.
6. Estimación de áreas de inundación dentro del embalse Vs las profundidades.
7. Cálculo del volumen de almacenamiento Vs profundidad.
8. A partir de los datos estimados en los pasos 6 y 7, se construyeron las curvas correspondientes.

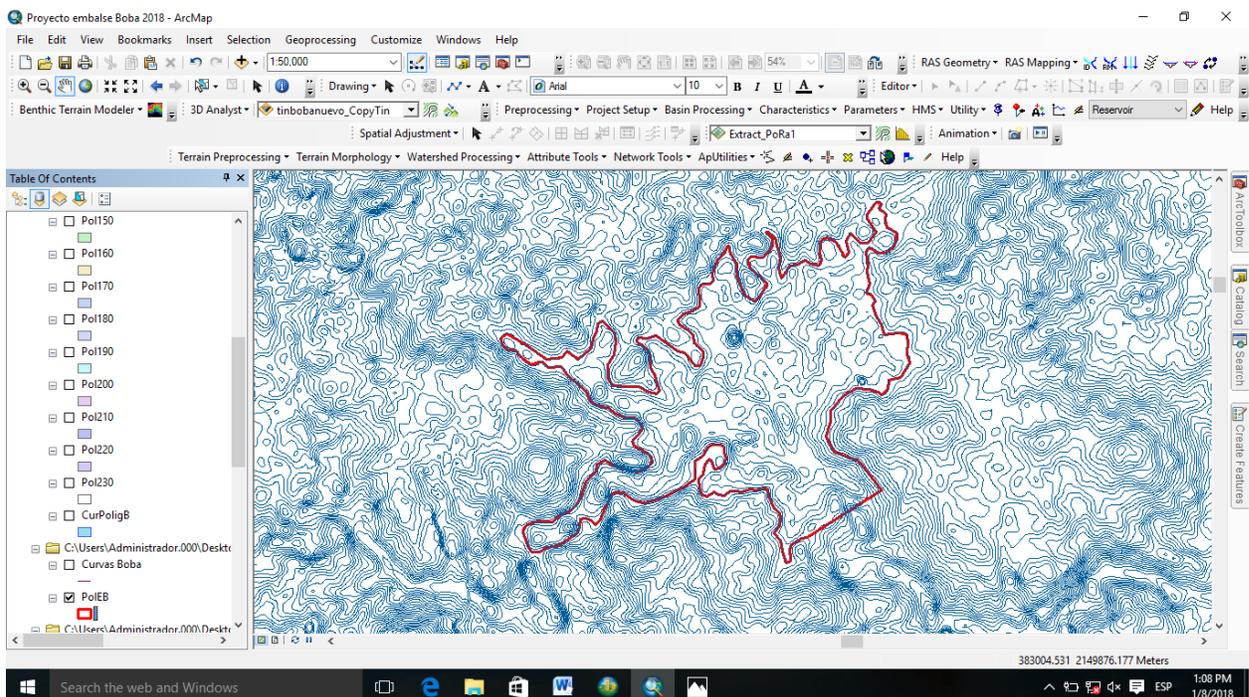


Figura 10. Área de aportación del embalse delimitada por ArcGIS.

Fuente: Elaboración propia

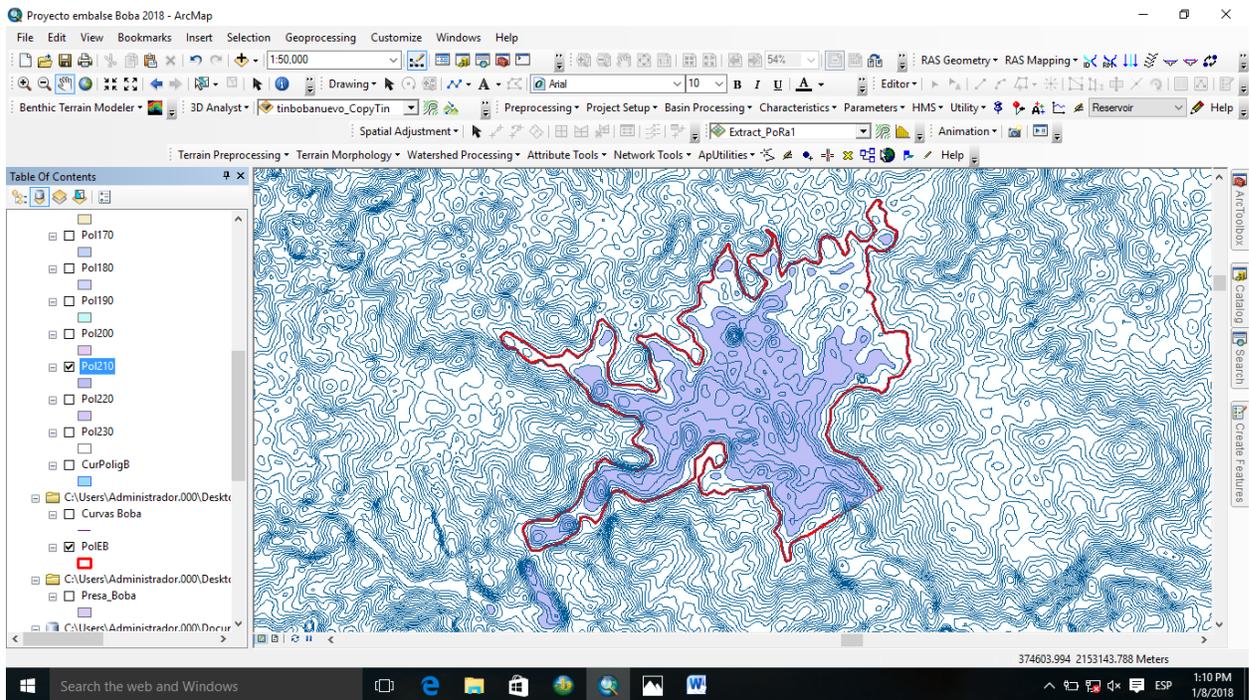


Figura 11. Área del embalse delimitado por ArcGIS en la cota 210 m.s.n.m.

Fuente: Elaboración propia

4.14. Modelo digital de profundidades

Un modelo digital de profundidades (MDP) es una representación visual y matemática de los valores de altura con respecto al nivel medio del mar que permite caracterizar las formas del relieve y los elementos u objetos presentes en el mismo. (Ver figura No.11)

A partir del Triangulated Irregular Network (TIN) generado y con el perímetro obtenido de la imagen satelital se generó el Modelo de Profundidades con una resolución espacial de 30m.

Red irregular de triángulos (TIN) es una forma de datos geográficos digitales basados en vectores y se construyen mediante la triangulación de un conjunto de vértice (puntos). Se

suele utilizar para el modelado de alta precisión de áreas más pequeña, como en aplicaciones de ingeniería, donde resultan útiles porque permiten realizar cálculos de áreas planimetría, área de superficie y volumen.

Se denomina MDT al conjunto de capas que representa distintas características de la superficie terrestre derivada de una capa de profundidades a la que se denomina MDP. (Ver figura No.12)

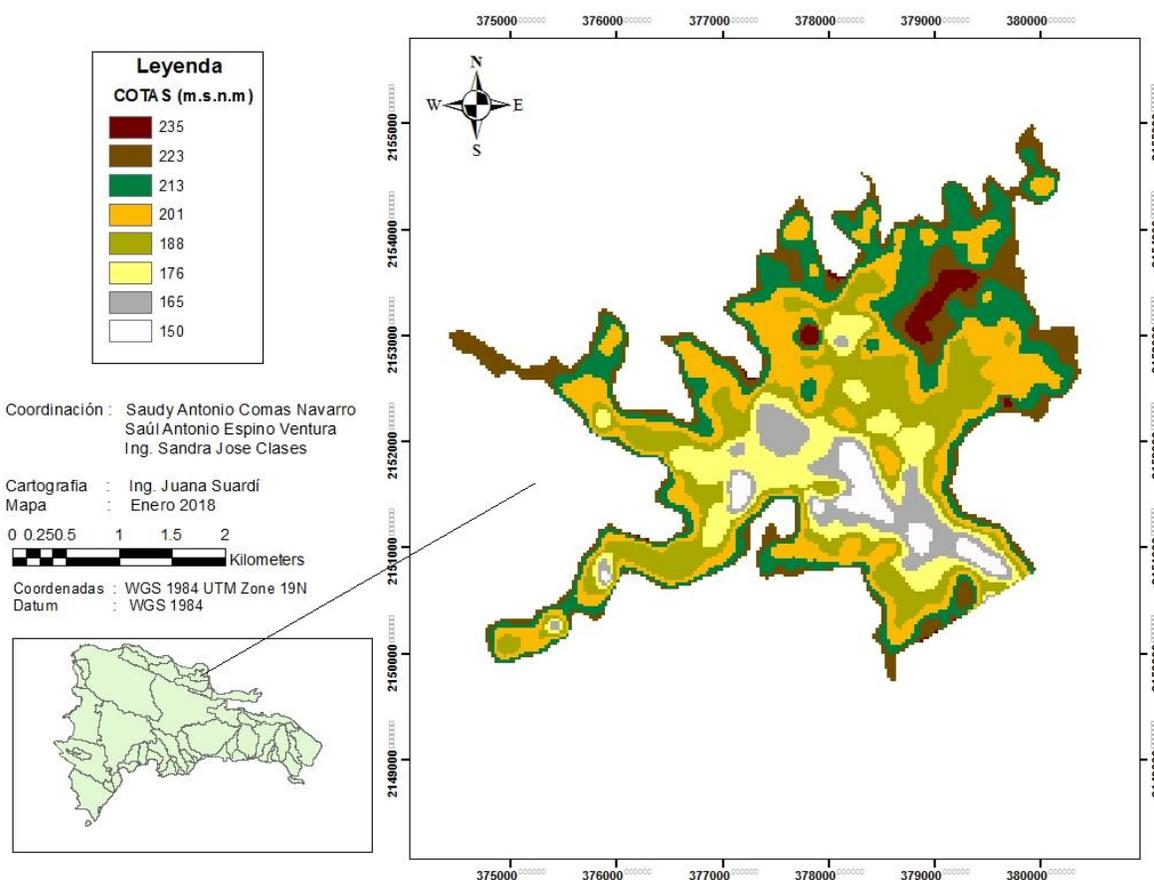


Figura 12. Modelo digital de profundidades (MDP) de la zona del embalse en la cuenca del río Boba.

Fuente: Elaboración propia

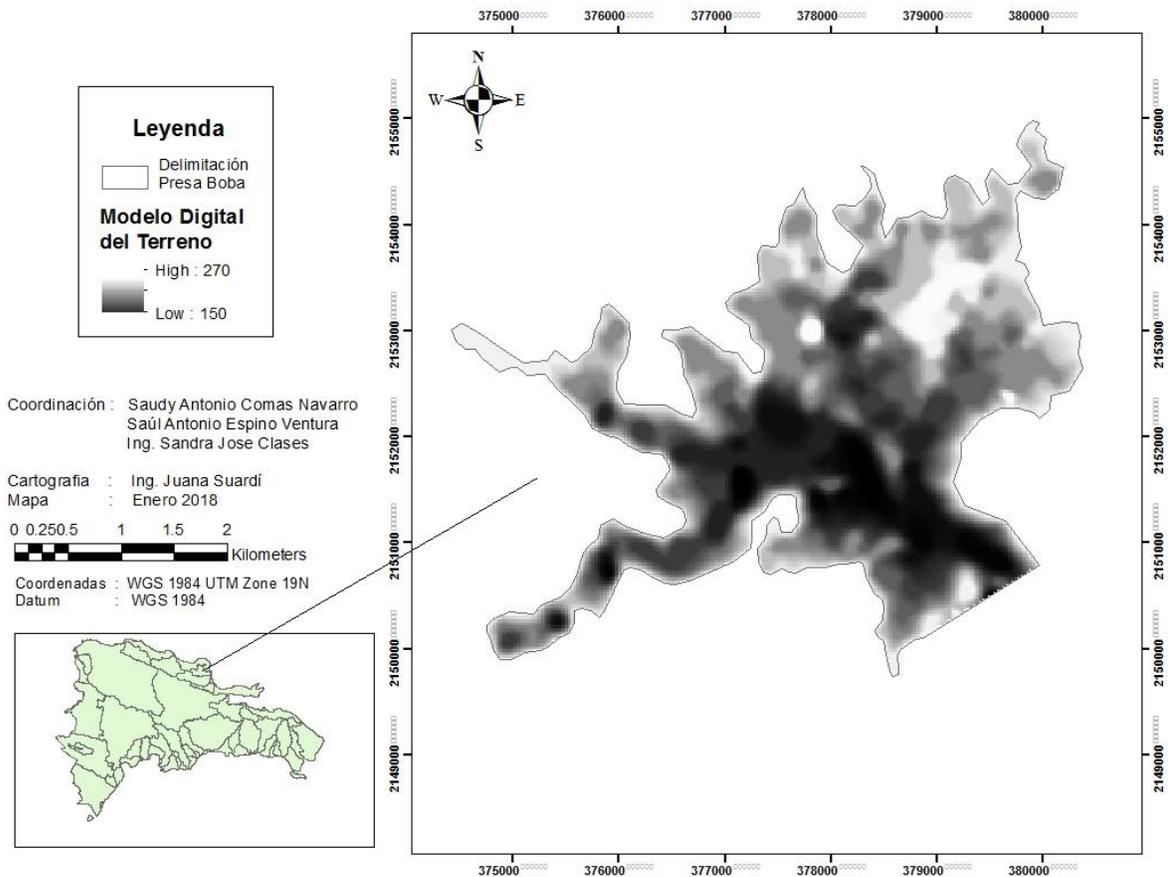


Figura 13. Modelo digital de terreno (MDT) de la zona del embalse en la cuenca del rio boba.

Fuente. Elaboración propia.

Con los procesos anteriormente descritos aplicando el programa ArcMap se obtuvo la siguiente tabla que establece una relación entre las cotas y el área y volumen de la misma.

(Ver tabla No.1)

Tabla No.1: área-volumen del embalse

COTA (m.s.n.m)	AREA (M2)	VOLUMEN (M3)
150	26,513.2662	0
160	218,559.9153	769,284.5216
170	791,387.1366	4,879,121.99
180	1,772,475.726	16,457,496.72
190	3,336,229.214	40,031,036.98
200	4,944,662.186	79,297,566.8
210	7,432,599.412	137,182,627.9

Fuente: Elaboración propia.

Los datos presentados en la tabla fueron obtenidos en el proceso de cálculo del programa, donde el área final y el volumen total son 7, 432,599.412 m² y 137, 182,627.9 mc respectivamente.

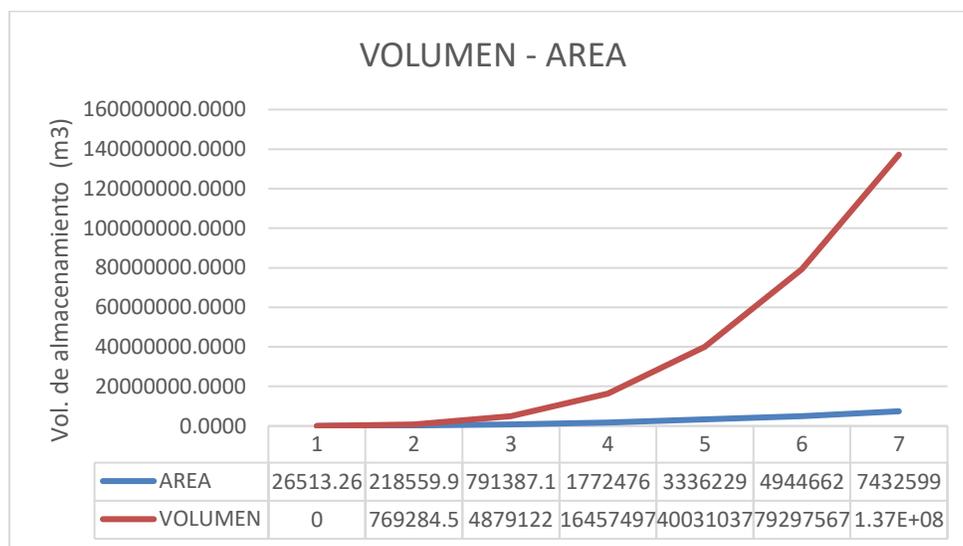


Gráfico 2: Curva área -volumen del embalse.

Fuente: Elaboración propia.

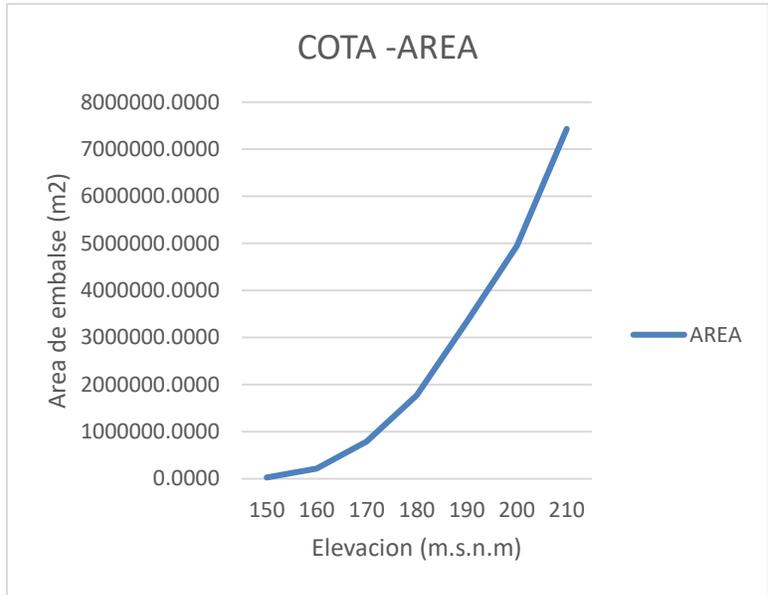


Grafico 3: Curva cota – área del embalse.
Fuente: Elaboración propia.

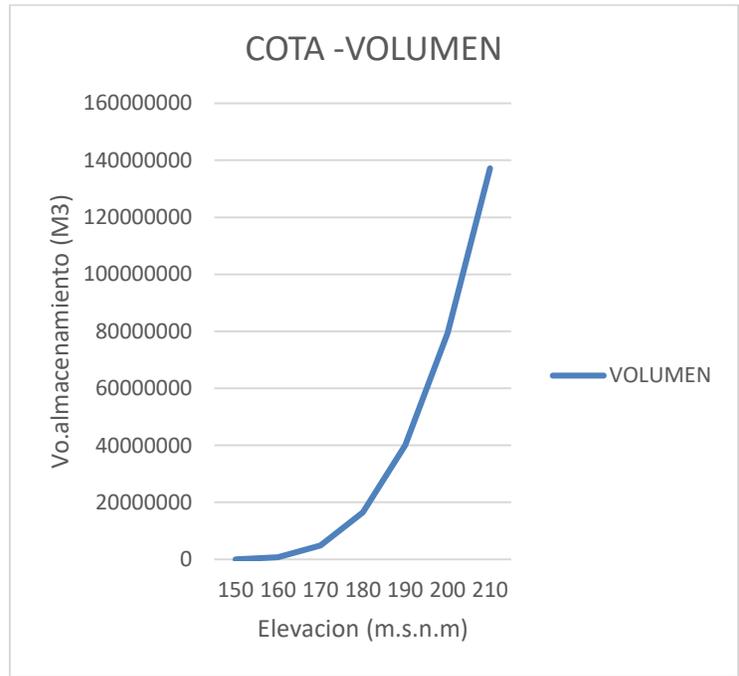


Grafico 4: Curva cota – volumen del embalse.
Fuente. Elaboración propia.

5. Cálculos.

De acuerdo a la capacidad total de almacenamiento (137, 182,627.9 mc) se pueden obtener el volumen muerto, volumen útil o activo, volumen de infiltración y volumen de escurrimiento.

- A. **Volumen muerto (Vm):** Según Guevara en su obra “Estructuras hidráulicas “, establece que conociendo la capacidad total de almacenamiento se puede asignar de un 10 a un 25%. En el caso objeto de estudio, se utilizó el 25%.

$$\begin{aligned}V_m &= 25\% \text{ (Capacidad total)} \\V_m &= 34, 295,656.98 \text{ mc}\end{aligned}$$

- B. **Volumen útil (Vu):** La capacidad total de un embalse es la suma de volumen muerto y el volumen útil o activo. Sabiendo esto es solo cuestión de sustraer el volumen muerto a la capacidad total para obtener el volumen útil.

$$\begin{aligned}V_u &= \text{Capacidad total} - \text{Volumen muerto} \\V_u &= 137, 182,627.93 - 34, 295,656.98 \\V_u &= 102, 886,971 \text{ mc}\end{aligned}$$

- C. **Volumen de infiltración (V inf):** El volumen de infiltración se define como el volumen de agua que penetra en los estratos de suelo.

$$V_{\text{inf}} = S \times A$$

$$\begin{aligned}S &= (25,400/\text{CN}) - 254 \\S &= 199.5714 \text{ mm} \\S &= 0.1995714 \text{ m}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}V_{\text{inf}} &= (0.1995714) (7, 432,599.412) \\V_{\text{inf}} &= 1, 483,334.27 \text{ mc}\end{aligned}$$

S = Infiltración potencial
A = área del embalse, m²
CN = Número de curva

D. **Evaporación (Ve):** La evaporación es una etapa permanente del ciclo hidrológico. Hay evaporación en todo momento y desde toda superficie húmeda. Considerada como un fenómeno puramente físico.

$$\begin{aligned}Ve &= (E_v p/a) (A) \\Ve &= (0.0712) (7, 432,599.412) \\Ve &= 529,201.0781 \text{ mc}\end{aligned}$$

E. **Volumen de escurrimiento (Ve):** Es el volumen de agua que circula sobre la superficie en una cuenca de drenaje.

$$\begin{aligned}V_{\text{esc}} &= C (P)x(A) \\V_{\text{esc}} &= 0.25 \times 2,387.9 \times 23,700 \\V_{\text{esc}} &= 14, 148,307.5 \text{ mc}\end{aligned}$$

C = Coeficiente de escurrimiento

P = Precipitación media anual en milímetro

A = Área de la cuenca en hectáreas

F. **Cálculo de altura de la presa (Hpresa):** Para este cálculo se realizó una diferencia de altura entre la cota más alta que contiene agua y el fondo del embalse. El espejo de agua alcanza una altura de 210 metros sobre el nivel del mar en cambio el fondo del embalse está a 150 m.s.n.m. sumándole a esto el borde libre que depende de la longitud Fetch medida desde la presa al punto más alejado del embalse y en línea recta = 4,589.30 m, dependiendo de esta longitud se obtiene el valor del borde libre arrojado por la siguiente tabla. (Ver tabla No.2)

Tabla No.2: Borde libre normal y mínimo según Fetch.

Fetch (km)	BL _{Normal} (m)	BL _{Mínimo} (m)
<1,6	1,2	0,9
1,6	1,5	1,2
4,0	1,8	1,5
8,0	2,4	1,8
16,1	3,0	2,1

Fuente: Bureau of Reclamation, 1987

H_{presa} = altura de espejo de agua – fondo del embalse + borde libre

$$H_{presa} = 210\text{m} - 150\text{m} + 2\text{m}$$

$$H_{presa} = 62\text{m}$$

G. Corona de la presa (B): Se fija este ancho para dar mayor volumen a la presa y aumentar así su estabilidad, para tener más resistencia la coronación contra los deterioros por el oleaje y para establecer los servicios que sean necesarios sobre la presa.

$$B = (H/5) + 3$$

$$B = (62/5) + 3$$

$$B = 15.5 \text{ m}$$

B = ancho de la corona, m

H = altura de la presa, m

H. Tiempo de llenado (T): Este cálculo fue realizado mediante la suma de caudales que aportan al embalse y la resta de las pérdidas en caudales. De parte del río y el escurrimiento se registra un aporte de 4.26487 m³/s de agua y por parte de la evaporación, infiltración y demanda 1.5113 m³/s.

$$T = V_t / (Q_e - Q_s)$$

$$T = 137,182,627.97 / (4.26487 - 1.5113)$$

$$T = 49,819,916.68 \text{ seg.}$$

$$T = 2 \text{ años.}$$

V_t = Volumen total, m³

Q_e = Caudal de entrada

Q_s = Caudal de salida

Conclusiones

- Bajo la implementación de la nueva metodología de diseño que toma como programa base al software ArcMap 10.3, se calculó un volumen de almacenamiento de 137, 182,627.93 mc. Este volumen se encuentra entre las cotas 150 y 210 m.s.n.m.

La capacidad total almacenada está conformada por el volumen útil y volumen muerto:

El volumen útil calculado fue de 102, 886,971 mc. Este volumen también se conoce como volumen de operaciones o activo y su finalidad es cumplir las necesidades de la demanda.

El volumen muerto corresponde a un 25 % del volumen de almacenamiento y el valor obtenido es de 34, 295,656.98 mc. Este volumen está formado por la acumulación de sedimentos provenientes del escurrimiento de la cuenca tributaria de 237 km². Cabe destacar que este volumen podría llegar a acumularse en más de 50 años.

- Los parámetros climáticos como la precipitación, evaporación y temperatura, tienen mucha incidencia en la zona de embalse.

La precipitación media anual de la zona es de 2387.9 mm, razón por la que el volumen de escurrimiento presenta un valor de 14, 148,307.5 mc anuales. Este volumen representa ganancia de agua para el embalse, lo que facilita su llenado y asegura que el embalse pueda satisfacer su demanda.

La evaporación media anual en la zona de estudio es de 71.2 mm. Este valor corresponde a una pérdida total por evaporación de aproximadamente 796,633.16 mc para el embalse. Sin embargo, debido a que la zona presenta una precipitación elevada el efecto de la evaporación es amortiguado por el volumen de agua que ingresa al embalse por medio de la lluvia.

El clima de la zona corresponde a bosque húmedo. Se caracteriza por ser cálido y tener a la vez mucha precipitación, razón por la cual la precipitación media anual es alta. La temperatura media anual en Nagua es de 26.1 °C. El mes más caluroso del año con un promedio de 27.3 °C es septiembre, mientras que el mes más frío del año con un promedio de 24.3 °C es enero.

- La realización de este embalse traerá muchas mejoras en varios aspectos a la zona. Entre ellos podemos destacar:
 - a) Suministrar agua potable a la población de una fuente confiable.
 - b) Aumentar los terrenos de riego lo que mejorara la agricultura y como consecuencia elevara más empleo y desarrollo económico a la zona.
 - c) Mejorar el servicio de energía eléctrica con una producción para la central hidroeléctrica de 79 Gw-h (Fuente: Departamento de hidrología INDRHI).
 - d) Como se ha mencionado anteriormente, la provincia María Trinidad Sánchez es objeto de inundaciones debido a las altas precipitaciones que

se presentan en el año, añadiéndose los fenómenos naturales como huracanes y tormentas que traen mucha agua y aumentan las precipitaciones ya existentes.

El embalse sirve para control de inundaciones, brindando más seguridad a los habitantes de las zonas cercanas al río. También brindando protección a los terrenos que se utilizan para la agricultura, evitando pérdidas millonarias que atrasan el desarrollo económico de la zona.

- En cuanto a llenado del embalse, tomando en cuenta las entradas por escurrimiento, caudal del río y las pérdidas generadas por demanda, infiltración y evaporación, se estima que el embalse podría llenarse en 2 años. Este tiempo puede variar de acuerdo a las precipitaciones de la zona.
- La cortina de retención tendrá una altura de 60 metros de altura hasta el nivel del agua, añadiéndose un borde libre de 2m, esto suma un total de 62 m de altura. La corona de la cortina por criterios ya mencionados entra 15.5 metros para brindar estabilidad a la estructura de retención.

Recomendaciones

Luego de haber realizado esta investigación, se considera pertinente hacer algunas recomendaciones según el criterio de los sustentantes. Estas son:

1. Creación de un manual de diseño hidrológico de embalses para la República Dominicana, que detalle los procedimientos que deben llevarse a cabo para realizar un diseño de embalses y que además incluya las características de las regiones del país.
2. Promover la enseñanza del software ArcMap aplicado a la hidrología e hidráulica, con el fin de brindar a los estudiantes una herramienta que les permita realizar cálculos de volúmenes, estudios topográficos de zonas de diseño, entre otros, de la mano de la tecnología.
3. Continuar aplicando la metodología descrita en esta investigación, con el fin de perfeccionarla tanto para el diseño de embalses como para la evaluación de embalses ya existentes.

Bibliografía

(INDRHI), D. d. (s.f.).

Ainzúa, A. (2007). Embalse por causas naturales.

Ambiente, D. E. (2017). Principales Presas.

Benítez, O. (17 de Julio de 2017). (D. Libre, Entrevistador)

Betancourt, G. (2014).

CFE. (1980). *Manual de Diseño de Obras Civiles*. Mexico.

Chow, V. T. (1994). *Hidrologia Aplicada* .

Custodia Gimena, E., Llamas Madurga, M. R., & Sahuquillo Herraiz, A. (1986). *Hidrologia superficial y subteranea* .

Fattorelli, S., & Fernandez, P. (2011). Diseño Hidrológico.

Galvez, J. J. (2011). *Cartilla tecnica : Ciclo Hidrologico* .

Guevara. (2000). Estructuras Hidráulicas.

Heras, R. (1970). *Manual de hidrologia*. Madrid.

INDRHI. (Enero, 2017). Construcción Presa de Boba en el Municipio de Nagua, Provincia María Trinidad Sánchez. Santo Domingo.

Mijares, F. A. (2001). *Fundamentos de Hidrología de Superficie*. Mexico.

Peña Bruñol, A. F., & Jacobo Villa, M. A. (2006). *Principios y fundamentos de la hidrologia superficial*. Ciudad de Mexico.

Perez Campomanes, G. (2016). manual de obras hidraulicas. Lima.

Rosas, J. A. (2004). *Hidrologia de superficie* . Puebla.

Sampieri, R. H. (2010). *Metodologia de la investigacion* . Mexico , DF: Mc graw hill.