UCLV
Universidad Central
"Marta Abreu" de Las Villas

FC
Facultad de
Construcciones

Departamento de Ingeniería Hidráulica

TRABAJO DE DIPLOMA

Implementación de obras de toma de agua flotantes en los embalses de la ciudad de Santa Clara. Estudio técnico económico.

Autor: Carlos Miguel Guerra García

Tutor: Dr. MSc Lic. Rodolfo Sánchez Morales

Consultor: MSc Ing. Bernardino Díaz Brooks

Santa Clara, Junio 2019

Copyright©UCLV

UCLV
Universidad Central
"Marta Abreu" de Las Villas

FC
Facultad de
Construcciones

Departament of Hydraulic Engineering

DIPLOMA THESIS

Implementation of floating intake systems in Santa Clara City's reservoirs. Technical and economic study.

Author: Carlos Miguel Guerra García

Thesis Director: Dr. MSc Lic. Rodolfo Sánchez Morales

Adviser: MSc Ing. Bernardino Díaz Brooks

Santa Clara, June 2019
Copyright©UCLV

DEDICATORIA

A mis padres, que son los principales artífices de lo que hoy soy.

AGRADECIMIENTOS

A Yamilet, mi segunda mamá por tantos años de cariño incondicional.

Al resto de mi familia por demostrarme que siempre están ahí para mí.

A mi compañera de la vida, Daile que siempre se las arregla para ocupar un lugar más grande en mi corazón.

A mi "*brother from another mother*" Luismi, por su amistad infinita.

A mis amigos y compañeros de aula.

A mi tutor Rodolfo por guiarme en los caminos del conocimiento.

A los profesores de la carrera y a los trabajadores de la EIPH-VC por su ayuda en la realización de este trabajo.

RESUMEN

La presente investigación pretende evaluar la factibilidad técnico-económica para la implementación de obras de toma flotantes en los embalses de abasto a la población de la ciudad de Santa Clara, puesto que los actuales embalses tienen muchos años de explotación y muestran claras deficiencias a la hora de suministrar agua de calidad a la población.

Para el desarrollo de esta investigación se realiza una amplia búsqueda bibliográfica. Luego, se establecen los criterios para determinar el estrato de agua con mejor calidad en el embalse para la extracción de agua mediante la obra de toma flotante. Además, se define qué embalses de abasto a la ciudad de Santa Clara necesitan la construcción de obras de toma flotantes, sobre la base del comportamiento de la calidad del agua y el análisis técnico de las estructuras de obra de toma. Finalmente, se evalúan los proyectos de obras de toma flotantes existentes para los embalses estudiados y se diseña la propuesta de obra de toma, a nivel de esquema, con revisión, y en algunos casos realización, de los cálculos hidráulicos pertinentes, utilizando los principios básicos de la hidráulica y con el apoyo del software Flowmaster VII. Para esta evaluación también se estiman los costos de materiales y de construcción, a través del Sistema de Precios de la Construcción (PRECONS II).

La investigación arroja como conclusión la factibilidad de construir obras de toma flotantes en los embalses Minerva y Palmarito, responsables de gran parte del abasto de agua a la ciudad de Santa Clara.

ABSTRACT

This research paper aims at evaluating the technical and economic feasibility of implementing floating intake systems for reservoirs that supply water to Santa Clara City, as the existent reservoirs are outdated, have been exploited for many years and are clearly inefficient when supplying quality water to population.

In order to develop this paper, a comprehensive search has been performed. Besides, some criteria have been established in order to determine the layer of the water having the best quality within the reservoir with the objective of extracting water by using the floating intake system. Furthermore, the reservoirs that supply water to Santa Clara City needing floating intake systems have been defined, based on the behavior of quality water and the technical analysis of floating intake systems. Finally, the existent projects of floating intake systems for the analyzed reservoirs have been assessed and the proposal of the water intake systems has been designed, at a scheme level, by revising, and sometimes performing the needed hydraulic calculations, and by utilizing the main principles of hydraulic engineering and Flowmaster VII software. In order to perform this assessment, materials and construction's costs have been estimated, through the *Sistema de Precios de la Construcción (PRECONS II).*

The research has concluded that is actually feasible to build floating intake systems for Minerva and Palmarito reservoirs, which supply water to a great percentage of Santa Clara City's population.

ÍNDICE

DEDICATORIA I

AGRADECIMIENTOS III

RESUMEN IV

ABSTRACT V

INTRODUCCIÓN 2

CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO. 6

1.1. Generalidades sobre las características físico-geográficas de la zona de estudio. 6

1.2. Características morfométricas de los embalses. 7

1.3. Calidad del agua. 9

1.3.1. Parámetros físicos de la calidad del agua en embalses. 9

1.3.2. Parámetros químicos y bioquímicos de la calidad del agua. 11

1.3.3. Parámetros biológicos de la calidad del agua. 14

1.4. Fenómeno de la estratificación en embalses. 16

1.5. Análisis vertical de la calidad del agua. 18

1.6. Obras de toma flotantes. Definiciones. 18

1.7. Estimaciones de costos de construcción. 21

CAPÍTULO II. MATERIALES Y MÉTODOS 23

2.1. Materiales. 23

2.2. Metodología empleada. 23

CAPÍTULO III. RESULTADOS 25

3.1. Análisis de las características morfométricas de los embalses analizados y sus obras de toma. 25

3.1.1. Características morfométricas de los embalses analizados. 25

3.1.2. Análisis de las obras de toma en los embalses analizados. 29

3.2. Análisis multifactorial de la factibilidad técnica para la construcción de obras de toma de fondo en los embalses bajo estudio. 31

3.3. Determinación de la profundidad más adecuada para la captación del agua en los embalses analizados. 32

3.3.1. Calidad del agua a la salida de las tomas de fondo de los embalses de abasto a la ciudad de Santa Clara. 37

3.3.2. Profundidades propuestas para la toma de agua en los embalses analizados. 38

3.4. Cálculo hidráulico de las obras de toma flotantes de los embalses analizados. 39

3.4.1. Embalse Minerva. 39

3.4.2. Embalse Palmarito. 41

3.5. Listado de materiales. 43

3.5.1. Proyecto del Embalse Minerva. 44

3.5.2. Proyecto del Embalse Palmarito. 44

3.6. Cálculos económicos. 44

CONCLUSIONES 46

RECOMENDACIONES 47

BIBLIOGRAFÍA 48

INTRODUCCIÓN

El agua potable, o agua para el consumo humano, es imprescindible en el día a día de cualquier individuo. El consumo de agua saneada, o potabilizada, es el motor principal para una salud robusta. Es por ello que el suministro de agua potable ha ocupado al hombre desde la antigüedad. Ya en la Grecia antigua se construían depósitos subterráneos para almacenar aguas pluviales, acueductos y tuberías de presión para garantizar el suministro local. Pero este bien es cada vez más escaso en muchos países, y se teme que esta escasez pueda incluso generar conflictos bélicos. De ahí la importancia de continuar construyendo sistemas eficaces de abastecimiento de agua potable, que lleguen siempre a un porciento elevado de la población.

Los sistemas para abastecimiento de agua potable constan de diversos componentes: captación, conducción, potabilización, desinfección, regulación y distribución; en cada uno se construyen las obras necesarias para que sus objetivos particulares sean alcanzados de forma satisfactoria. La captación se refiere a la extracción del agua de las posibles fuentes; la de conducción al transporte del recurso hasta el punto de entrega para su disposición posterior y la regulación tiene por objeto transformar el régimen de alimentación del agua proveniente de la fuente que generalmente es constante, en régimen de demanda variable que requiere la población. Por su parte, el objetivo de la distribución, es proporcionar en el domicilio de los usuarios, con las presiones adecuadas para los usos residenciales, comerciales e industriales normales, al igual que el de suministrar el abastecimiento necesario para la protección contra incendios en la zona de demanda, urbana o rural (Jaime-Jáquez *et al.*, 2002).

Dentro del componente de captación, juega un papel fundamental la estructura encargada de recoger el agua para su posterior conducción fuera del embalse: la obra de toma. Estas estructuras se construyen con el objeto de extraer el agua de forma controlada y poder utilizarla con el fin para el cual fue proyectado. Se proyectan obras de toma para presas de almacenamiento, presas derivadoras, plantas de bombeo y tomas directas en corrientes permanentes (Martinez-Menez *et al.*, 2005).

Existen diferentes tipos de clasificaciones para las obras de toma en embalses, entre ellas Takasu y Hirose (2002) plantean tres tipos diferentes: tomas superficiales, tomas subsuperficiales (sumergidas) y tomas en diferentes niveles (tomas selectivas). De ellas, las tomas superficiales se utilizan con el objetivo de extraer agua de la superficie del embalse cuando la misma está relativamente limpia. Como es lógico, la extracción debe seguir las fluctuaciones del nivel del embalse. Es necesario prevenir la contaminación del estrato más bajo con el objetivo de extraer de forma eficiente el agua de la superficie.

Entre las distintas variantes de tomas, las obras de tomas flotantes son un caso particular, que han destacado por los resultados relevantes en la calidad del agua captada, luego de su implementación.

Este tipo de estructura es de gran utilidad ya que permite extraer el agua de mejor calidad dentro del reservorio, que por lo general se encuentra a profundidades intermedias. Con esto, se elimina el proceso de remoción de algas desde la superficie y de los azolves y detritus desde el fondo, con el agua de abasto; a la vez que se disminuyen los costos de potabilización.

En Cuba las estructuras con tomas flotantes no se han implementado con regularidad desde los proyectos originales de embalses, ya que la mayoría fueron diseñados para ser utilizados en la agricultura. Por esta causa, salvo contadas excepciones, la mayoría de los embalses cuentan con obras de toma subsuperficiales (tomas de fondo).

Cuando en un embalse se construye una obra de toma de fondo se entrega al acueducto el agua de la peor calidad existente en su vaso. Además, con el paso de los años el nivel de sedimentos en el fondo del embalse va aumentando, lo que trae consigo que, en algún momento de su vida útil, el volumen muerto alcance el nivel de la obra de toma de fondo extrayéndose agua cargada de sólidos y de pésima calidad, pudiendo llegar a inutilizarse la obra.

Durante la época de lluvias (meses de mayo a octubre) la calidad del agua en los estratos más bajos (cercanos al fondo) se deteriora. Este fenómeno tiene lugar debido a que el agua extraída por la toma procede de las capas inferiores de los embalses, donde debido a la acumulación de materia orgánica ocurre una

disminución progresiva del oxígeno disuelto, que a su vez provoca un incremento no deseado de color, turbiedad y de las concentraciones de sulfuros, iones amonio y metales como hierro y manganeso, entre otros.

En la ciudad de Santa Clara están representadas estas problemáticas de manera muy clara. Esta urbe es abastecida por cuatro fuentes, los embalses Hanabanilla, Agabama-Gramal, Minerva y Palmarito, de los cuales solo el sistema Agabama-Gramal fue diseñado para el abasto a la población, el embalse Hanabanilla fue construido para generación de electricidad y los otros dos son embalses construidos para satisfacer las demandas de la agricultura.

Todos los embalses tienen muchos años de explotación. Estos, en la práctica, están captando el agua del fondo del embalse, deficientes en oxígeno disuelto, con alto color, concentraciones altas de materia orgánica, sólidos suspendidos, Hierro y Manganeso, como principales problemas de calidad. En el periodo lluvioso, la calidad del agua tomada del fondo se empeora aún más, llegando a colapsar la capacidad de tratamiento de las plantas potabilizadoras existentes. La problemática explicada incide gravemente sobre la distribución efectiva de agua a la población, incrementa el consumo de energía y de productos químicos en las plantas potabilizadoras, sin lograr la calidad deseada.

Cuando esto sucede el agua entregada a la población no posee la calidad óptima para su consumo, lo que contribuye, además, a la proliferación de enfermedades y efectos perjudiciales para la salud y también provocando daños a la infraestructura del acueducto y sus respectivas redes.

Objeto de estudio:

Sistemas de abasto a la población.

Campo de acción:

Obras de toma en embalses de abasto a la población de Santa Clara.

Problema de investigación:

¿***Cuál*** es la factibilidad técnica y económica ***para*** la implementación de obras de toma flotantes en los embalses de abasto a la población de Santa Clara?

Objetivo General:

Evaluar la factibilidad técnico-económica para la implementación de obras de toma flotante en los embalses de abasto a la población de la ciudad de Santa Clara.

Hipótesis:

Si se construyen obras de toma flotantes en los embalses de abasto a la población de la ciudad de Santa Clara que la requieran, se logrará mejorar la calidad del agua que se entrega a las plantas potabilizadoras y se facilita la calidad del servicio de suministro de agua potable a la población servida.

Objetivos específicos:

1. Analizar el comportamiento estacional de la calidad del agua dentro de los embalses y los factores que la condicionan.
2. Diagnosticar las obras de toma existentes en los embalses de abasto a la población de la ciudad de Santa Clara.
3. Evaluar la factibilidad técnica para la construcción de obras de toma flotantes en los embalses de abasta a Santa Clara, evaluando los posibles proyectos existentes.
4. Elaborar los diseños de tomas flotantes, a nivel de esquema, para los embalses donde sea factible su construcción y no tengan un proyecto disponible.
5. Realizar el análisis económico de los proyectos hidrotécnicos de obra de toma flotantes existentes y propuestos.

CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO.

1.1. Generalidades sobre las características físico-geográficas de la zona de estudio.

- **Ubicación de la zona de estudio**

Santa Clara es un municipio ubicado en el centro de la provincia Villa Clara en el centro del país. El municipio posee un área geográfica total de 513.7 km^2. Limita al noreste con el municipio Cifuentes, por el noroeste con Camajuaní, al este con Placetas, al sureste con Manicaragua y al suroeste con Ranchuelo. Santa Clara, como ciudad, tiene una superficie total de 61.82 Km^2.

- **Clima.**

El clima característico de la ciudad de Santa Clara es el tropical de sabanas con precipitaciones superiores a los 1 000 mm anuales, distribuidas en dos estaciones bien diferenciadas: una húmeda (de mayo a octubre) y otra seca (de noviembre a abril). Las temperaturas oscilan, en promedio, entre 22 °C (enero) y 27 °C (meses de verano). Como es propio de las latitudes tropicales, las mayores diferencias de temperatura ocurren entre el día y la noche con valores que pueden llegar hasta los 32 °C y 33 °C en las tardes veraniegas. La humedad relativa es bastante elevada, especialmente en los meses de mayo a septiembre, por lo que la sensación térmica podría superar los registros instrumentales en varios grados (INSMET, 2019).

- **Relieve.**

La ciudad de Santa Clara se encuentra ubicada a unos 100 metros sobre el nivel medio del mar (msnmm), en un terreno ondulado rodeado de cerros cónicos (< 3 50 msnmm), pertenecientes al domo de Cubanacán (alturas de Santa Clara).

- **Hidrografía.**

Atravesada por los ríos Bélico y Cubanicay, pertenecientes a la cuenca del rio Sagua la Grande, y algunos arroyos tributarios del Sagua la Chica (afluentes del rio Ochoa, cuyo cauce discurre al Este), sus suelos se asientan, mayoritariamente,

sobre un lecho de rocas serpentinitas que le confieren poca productividad; solo al Norte se presentan suelos más evolucionados.

- **Vegetación.**

La vegetación característica va desde los cuabales hasta las sabanas y bosques típicos cubanos, destacándose, dentro de los límites urbanos, el Parque Histórico Cultural, la Loma del Capiro y el Monte Carrascal, así como la Reserva Florística Manejada Sabanas de Santa Clara en la periferia de la urbe.

1.2. Características morfométricas de los embalses.

La morfometría es el conjunto de métodos para medir las dimensiones físicas de un individuo o sistema. Las evaluaciones morfométricas en embalses constituyen una herramienta importante para la comprensión de los eventos físico-químicos y biológicos que ocurren en estos ambientes. Los parámetros morfométricos de un embalse son de simple obtención y pueden suministrar algunas informaciones sobre el comportamiento del ecosistema del ambiente acuático.

El conocimiento de la forma de un lago o embalse es fundamental, dado que existe una relación de la forma con la circulación de agua y con los mecanismos limnológicos de funcionamiento de estos ecosistemas. La morfometría de los embalses influencia considerablemente la dinámica de los procesos en el agua y en el sedimento, teniéndose en cuenta los mecanismos de circulación inducida por el viento y por el enfriamiento y calentamiento térmico (Tundisi y Matsumura-Tundisi, 2008).

Las principales características morfométricas de los embalses se definen a continuación:

<u>Longitud máxima</u> (L): La máxima distancia entre dos puntos de la línea de orilla sobre la superficie del embalse. Esta longitud es potencialmente el máximo fetch o longitud sobre la cual actúa el viento sobre la superficie del embalse, sin interrupción del terreno. Sus unidades de medida más frecuentes son m o km.

Ancho máximo (b): La máxima distancia entre orillas, medida perpendicularmente a la línea de longitud máxima. Sus unidades de medida más frecuentes son m o km..

Ancho medio ($\bar{b}$): Es igual al área superficial del embalse al nivel de aguas normales (A_{NAN}) dividida por su longitud máxima (L) para el mismo nivel de agua:

$$\bar{b} = A_{NAN}/L$$

Sus unidades de medida más frecuentes son m o km.

Área (A): Es el área de la superficie de agua o espejo de agua de un embalse, delimitada por la línea de orillas a cada profundidad (z). Sus unidades de medida más frecuentes son m^2 o km^2.

Volumen (V): El volumen del vaso del embalse es la suma de los volúmenes de los estratos para profundidades sucesivas, desde la superficie hasta el punto de máxima profundidad. Sus unidades de medida son m^3 o hm^3.

La fórmula más empleada para el cálculo del volumen de un embalse es mediante la suma de una serie de conos irregulares truncados de múltiples estratos; siendo la fórmula del volumen de cada estrato la siguiente:

$$V_{estrato} = \frac{h}{3}(A_1 + A_2 + \sqrt{A_1 A_2})$$

Donde:

h = el espesor vertical del estrato, en m.

A_1 = área de la superficie superior del estrato, en m^2.

A_2 = área de la superficie inferior del estrato, en m^2.

Profundidad máxima ($z_{máx}$): La mayor profundidad del embalse, en m.

Profundidad media ($\bar{z}$): Se define como el volumen dividido el área superficial, para el nivel de aguas normales (NAN):

$$\bar{z} = (V/A)_{NAN}$$

Su unidad de medida es m.

Línea de costa (S_L): Es la línea definida por la intersección de la tierra con el agua permanente de un embalse. Fluctúa en respuesta a las variaciones de las precipitaciones y las extracciones (explotación del embalse).

Sus unidades de medida son m o km.

Curva hipsográfica: Es la curva de profundidad contra área del embalse. Es una representación gráfica de la relación entre el área superficial del espejo de agua y la profundidad para el vaso del embalse.

Curva profundidad (cota) – volumen: Representa la relación de la profundidad con el volumen de un embalse. Es muy empleada para determinar el volumen de agua almacenada en un embalse, a partir de la medición del nivel de agua en el mismo.

1.3. Calidad del agua.

Se puede definir calidad del agua como un conjunto de características de naturaleza física, química y biológica que asegura determinado uso o conjunto de usos, debiendo estar dentro de ciertos límites o estándares previstos en la legislación vigente para que estos puedan ser viabilizados (OMS, 2006).

1.3.1. Parámetros físicos de la calidad del agua en embalses.

La percepción del ser humano en las alteraciones de la calidad del agua se da a través de sus sentidos y por las características físicas del agua, puesto que se espera que esta sea transparente, sin color e inodora. En realidad, en la naturaleza el agua usualmente posee color, dado por material orgánico en descomposición, olor y hasta incluso gusto (Porto *et al.*, 1991)

A continuación, se analizarán las principales características físicas de las aguas presentes en los embalses de abasto a la ciudad de Santa Clara durante los periodos de sequía y de precipitaciones.

- **Temperatura del agua**

La temperatura del agua es la medición de la intensidad de calor. El origen natural de la temperatura es la transferencia de calor por radiación, conducción y convección (atmosfera y suelo). Es determinada por la cantidad de energía calórica que es absorbida por un cuerpo de agua. La manifestación de esta energía se puede propagar en el agua, de molécula a molécula, muy lentamente por conducción (Esteves, 2011).

- **Turbidez**

La turbidez es la medida de la capacidad del agua de dispersar la radiación solar por la presencia de partículas en suspensión, que pueden o no presentar color propio. Es expresada, entre otras unidades, por NTU (*Nephelometric Turbidity Units*). En general, la turbidez proviene de la carga de solidos erosionada en el área de drenaje de los afluentes del embalse, así como por la erosión laminar observada en la cuenca hidrográfica como un todo. Las algas, comportándose en el agua como partículas en suspensión, también influyen sobre el parámetro de la turbidez (Bollman *et al.*, 2005; Silva-Pereira, 2008).

- **Conductividad eléctrica**

La conductividad eléctrica, o conductancia específica, es una expresión numérica de la capacidad del agua de conducir corriente eléctrica. Este parámetro posee valores expresados en micro Siemens por centímetro ($\mu S/cm^{-1}$), siendo determinada por la presencia de substancias iónicas disueltas (aniones y cationes) en el agua que conducen la corriente eléctrica, pero su valor, además de depender de la temperatura, también difiere para cada ión (Silva-Pereira, 2008; Esteves, 2011).

- **Color**

El color del agua es producido por la reflexión de la luz en partículas minúsculas, denominadas coloides, finamente dispersas, de origen predominantemente orgánico y dimensión inferior a 1µm. Es el parámetro responsable por la coloración en el agua. La descomposición de la materia orgánica (principalmente vegetales –

ácidos húmicos y fúlvicos), el hierro y el manganeso son el origen natural de este parámetro. El origen antropogénico se debe a los residuos industriales y efluentes domésticos sin tratamiento (OMS, 2006).

- **Transparencia (disco Secchi):**

La intensidad de la luz a la profundidad z, I_z, es función de la intensidad de luz que incide sobre la superficie del agua del embalse, I_0, y el logaritmo del valor negativo del producto del coeficiente de extinción ,η, y la profundidad, z:

$$I = I_0 e^{-\eta z}$$

El coeficiente de extinción total del agua de un embalse es normalmente definido como la suma de los coeficientes de extinción del agua (η_{agua}), de las partículas suspendidas (η_{susp}) y de las sustancias coloreadas disueltas en el agua (η_{color}):

$$\eta_{total} = \eta_{agua} + \eta_{susp} + \eta_{color}$$

En general, la penetración de la luz en el agua es sujeta a la absorción de estas sustancias en el estrato superficial hasta donde consigue llegar.

La trasparencia mediante disco Secchi, es un método simple, de bajo costo y de reproducibilidad aceptable, utilizado para estimar el alcance de la penetración de la luz en el agua de un cuerpo de agua. Este es un disco, de sectores blanco y negro, de 20 a 30 cm de diámetro que es colocado en el agua hasta una profundidad en la que no es observado y luego es levantado lentamente, registrándose la profundidad de su reaparición. La profundidad se mide en cm o m, según la calidad del agua del embalse (Wetzel, 2001; Esteves, 2011).

Estudios fotométricos han demostrado que la radiación luminosa penetra a profundidades superiores a las medidas mediante el empleo del disco Secchi.

1.3.2. Parámetros químicos y bioquímicos de la calidad del agua.

Los parámetros químicos son las variables más importantes que caracterizan la calidad del agua y componen los indicadores e índices para que se establezcan sus

múltiples usos. A través de ellos podemos relacionar valores que nos permitan, por ejemplo:

- Clasificar el agua por su contenido mineral, a través de descomposición de sus iones;
- Caracterizar el grado de contaminación y el origen o naturaleza de los principales contaminantes o sus efectos;
- Tipificar casos de cargas o picos de concentración de substancias y señalar las principales fuentes;
- Evaluar el equilibrio bioquímico necesario para mantener la vida acuática y emular las necesidades de nutrientes, tales como compuestos de nitrógeno, fosforo, silicio, hierro y de cofactores enzimáticos.

Los estándares legales de usos del agua, por ejemplo, consumo humano, balneabilidad, riego, vertido de efluentes, de clasificación de cuerpos de agua, enumeran los principales parámetros químicos a ser evaluados en la caracterización de la calidad del agua (OMS, 2006).

A continuación, analizaremos los principales parámetros químicos que tributan a la calidad del agua de los embalses de abasto a la ciudad de Santa Clara.

- **Oxígeno disuelto.**

Entre los gases disueltos, el oxígeno (O_2), es un gas de gran importancia biológica que, en los ecosistemas acuáticos, participa en un sinnúmero de reacciones químicas. La solubilidad del oxígeno en el agua, como de todos los gases, está asociada a dos factores: temperatura y presión. De esta manera, con la elevación de la temperatura y disminución de la presión, se produce la reducción de la solubilidad del oxígeno en el agua (Esteves, 2011).

En un embalse, los niveles de oxígeno disuelto tienen "*importancia primaria*" en la calidad del agua por su influencia sobre los procesos químicos y bioquímicos que ocurren en las diferentes profundidades; procesos capaces de establecer el equilibrio o desequilibrio ecológico del cuerpo del agua. En las regiones tropicales,

el oxígeno disuelto es el factor más crítico desde el punto de vista de la calidad del agua (Tundisi y Matsumura-Tundisi, 2008).

- **PH.**

El pH (potencial de hidrogeno) representa la concentración de iones de hidrogeno (H^+), en el agua, y representa la intensidad de las condiciones ácidas o alcalinas del ambiente acuático. Este parámetro probablemente es uno de los más utilizados en la rutina de monitoreo de la calidad del agua (Von-Sperling, 2005).

- **Hierro y Manganeso.**

Ambos metales se originan en la disolución de compuestos de rocas y suelos. El hierro es comúnmente encontrado en aguas naturales superficiales y subterráneas, presentándose en las formas insoluble (Fe^{+3}) y disuelta (Fe^{+2}). El Manganeso, aunque menos abundante, cuando está presente se encuentra asociado al Hierro. El Manganeso también se presenta en la forma insoluble (Mn^{+4}) y disuelta (Mn^{+2}).

En ambos casos, las especies solubles son las formas iónicas reducidas y las especies insolubles son las formas iónicas oxidadas. Lo anterior, explica por qué en el agua bajo condiciones anóxicas se incrementa el contenido de Hierro y Manganeso disuelto en el agua. Esto ocurre debido a la redisolución de estos metales en forma reducida, desde los sedimentos del fondo del embalse, al ocurrir un cambio de ambiente, de oxidante (con oxígeno) a reductor (sin oxígeno).

La disolución de compuestos del suelo es el origen natural para estos componentes; mientras que los efluentes industriales y mineros, son la principal fuente de origen antropogénico. Estos componentes tienen poco significado sanitario, en las concentraciones encontradas usualmente en las aguas naturales. En pequeñas concentraciones causan problemas de color en el agua. En ciertas concentraciones, pueden producir sabor y olor, y también manchar ropas cuando son lavadas (Von-Sperling, 2005).

- **Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO).**

La Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) del agua es la cantidad de oxigeno consumida por los microorganismos al oxidar la materia orgánica bajo condiciones aeróbicas. La DBO es normalmente considerada como la cantidad de oxigeno consumido durante un determinado periodo de tiempo, a una temperatura de incubación especifica. Un periodo de tiempo de 5 días en una temperatura de incubación de 20°C es frecuentemente usado y referido como $DBO_{5,20}$ o simplemente DBO_5 (Margaleff, 1983).

La DBO es un parámetro de fundamental importancia en la caracterización del grado de contaminación de un cuerpo de agua. En otras palabras, es una prueba que permite conocer la cantidad de materia orgánica presente en un cuerpo de agua, a través de una serie de mediciones de oxígeno en una muestra contenida en frasco sellado para impedir el intercambio de gases entre la muestra y el ambiente exterior.

- **Demanda Química de Oxígeno (DQO).**

Es la cantidad de oxigeno necesaria para la oxidación de la materia orgánica de una muestra por medio de un agente químico fuertemente oxidante, como el dicromato de potasio. Los valores de la DQO son siempre mayores que los de la DBO, porque por vía química se consigue oxidar varias sustancias que por vía bioquímica no es posible, por ejemplo, sustancias artificiales sintetizadas por el hombre o sustancias naturales de alta masa molecular o estructuras complejas que los microorganismos no son capaces de descomponer, al menos a corto plazo. El aumento de la concentración de DQO en un cuerpo de agua se debe principalmente a vertidos de origen industrial. La determinación es hecha por titulación química del exceso de oxidante una vez oxidada toda la materia orgánica presente en la muestra. El resultado del ensayo es obtenido en tres horas (Von-Sperling, 2005).

1.3.3. Parámetros biológicos de la calidad del agua.

El monitoreo de las variables biológicas constituye una herramienta muy importante para la evaluación de la calidad del agua en embalses. El uso de bioindicadores ha sido corriente en la evaluación de impactos ambientales provocados por la mala

administración del ambiente, ya que animales, plantas, microorganismos y sus complejas interacciones con el medio ambiente responden de manera diferenciada a las modificaciones del paisaje, produciendo informaciones, que no solo indican la presencia de contaminantes, sino también como estos interactúan con la naturaleza, proporcionando una mejor indicación de sus impactos en la calidad de los ecosistemas (Souza, 2001).

- **Coliformes.**

La denominación genérica coliformes designa a un grupo de especies bacterianas que tienen ciertas características bioquímicas en común e importancia relevante como indicadores de contaminación del agua y los alimentos. Estas especies se dividen fundamentalmente en dos grupos: los coliformes fecales o termo-tolerantes y los coliformes totales.

Las bacterias del grupo “coliformes fecales o termo-tolerantes” habitan normalmente el tracto intestinal de los endotermos (animales de sangre caliente), sirviendo, por tanto, como indicadores de la contaminación de una muestra de agua por heces. Como la mayoría de las patologías asociadas al agua – denominadas de transmisión hídrica, tales como fiebre tifoidea, fiebre paratifoidea, disentería bacilar y cólera – son transmitidas por vía fecal, o sea, los organismos patógenos eliminados por las heces alcanzan el ambiente acuático, pudiendo contaminar a las personas que se abastecen de esta agua.

Según la (Oficina-Nacional-de-Normalización, 2012) los “coliformes totales” son bacilos Gram negativos, aerobios o anaerobios facultativos, no esporulados, oxidasa negativos, capaces de crecer en presencia de sales biliares o agentes tensoactivos que fermentan la lactosa con producción de ácido y gas a (35,0 ± 0,5) ºC, entre 24 horas a 48 horas y que pueden presentar actividad de la enzima β-galactosidasa. La mayoría de las bacterias del grupo coliforme son de los géneros *Escherichia*, *Citrobacter*, *Klebsiella* y *Enterobacter* pertenecientes a la familia *Enterobacteriaceae*. Cuando se determina por la técnica de tubos múltiples de fermentación, sus resultados se expresan como Número Más Probable por cada

100 mL de muestra (NMP/100 mL); y en Unidades Formadoras de Colonias (UFC) cuando se realiza por el ensayo de filtración por membrana.

1.4. Fenómeno de la estratificación en embalses.

Según la clasificación del régimen térmico propuesta por (Wetzel y Likens, 2000) se puede afirmar que la mayoría de los embalses en Cuba con profundidad máxima superior a 10 m, son monomícticos cálidos. Esto quiere decir que son embalses donde la temperatura del agua a cualquier profundidad nunca desciende de los 4ºC, existe una circulación libre en período seco (invierno) con temperaturas mayores o iguales a 4ºC y existe una estratificación térmica del embalse en gran parte del período húmedo (verano).

Esta clasificación la podemos comprobar, apoyándonos en el diagrama de Henderson que se muestra a continuación (Figura 1).

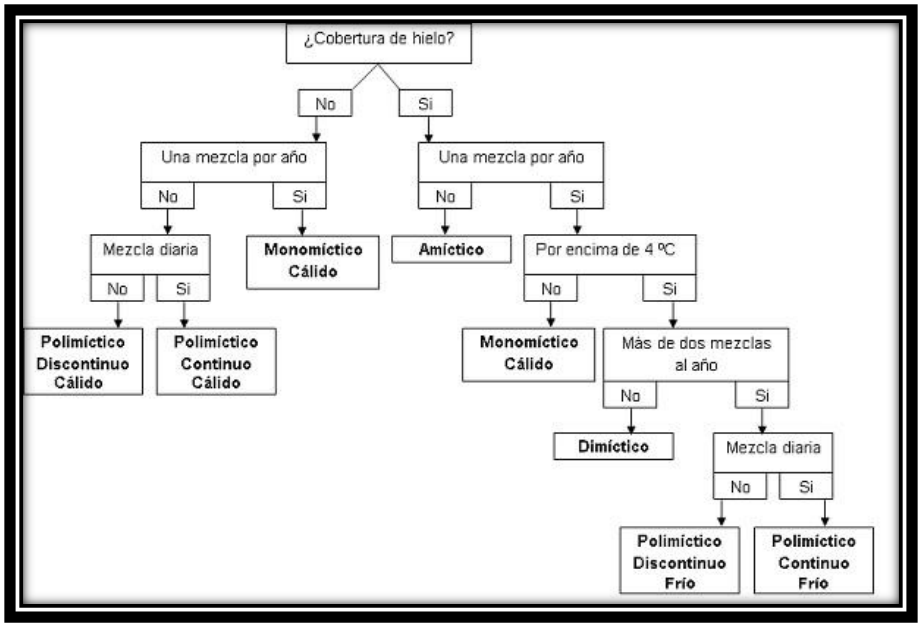

Figura 1. Diagrama de Henderson para la clasificación del régimen térmico de embalses.

A partir del análisis de la clasificación de los embalses en Cuba se puede afirmar que nuestros embalses, con 10 m o más de profundidad, dentro de un año natural presentan dos condiciones fundamentales: totalmente mezclados o estratificados.

Los cambios en la temperatura del agua provocan variaciones en su densidad. A valores altos de temperatura le corresponde una mayor variación de la densidad por unidad de temperatura. Las capas de agua de la superficie de los embalses absorben mayor cantidad de calor que los estratos más profundos, por tanto, se vuelven menos densas que las capas más profundas y tienden a flotar sobre estas. La diferencia de densidades entre las capas más profundas y las más superficiales, no permite su mezcla. Este fenómeno es conocido como estratificación térmica (Hutchison, 1957).

El proceso de estratificación térmica de los embalses depende de la acción del viento, de los movimientos de masas de agua, y de su morfometría (Wetzel, 2001). En los embalses estratificados la masa de agua superior se denomina epilimnio y la inferior hipolimnio. La masa de agua intermedia caracterizada por una marcada discontinuidad térmica se denomina metalimnio y el gradiente térmico entre el epilimnio y el hipolimnio se conoce como termoclina. La termoclina es el plano donde ocurre el máximo gradiente vertical de la temperatura (Wetzel, 2001).

En Cuba, al presentarse dos periodos meteorológicos anuales bien pronunciados se puede observar claramente este fenómeno, puesto que, en el periodo lluvioso con altas temperaturas, los embalses se estratifican.

Por otra parte, en el período seco, que coincide con los meses de temperaturas más frías en nuestro país, los embalses pueden mezclarse (la masa de agua superior se mezcla con la inferior). Cuando esto ocurre se dice que el embalse está circulando o que se encuentra en periodo de mezcla. Durante el periodo de circulación toda la columna de agua presenta una temperatura similar, con pequeña tendencia a disminuir hacia el fondo. Los cambios en la estructura térmica de un embalse influyen sobre la concentración de OD, de los nutrientes (nitrógeno, fósforo, sílice, entre otros) (Hanson et al., 2006, Jeppesen et al., 2005; Wilhelm y Adrian, 2008) y así como en la liberación de metales desde los sedimentos (Hem, 1985).

Estudios a largo plazo de los procesos de mezcla y estratificación en embalses requieren de mediciones de la temperatura en la columna del agua. Estos estudios representan un buen indicador para la vigilancia del cambio climático si se considera

la alta relación que existe entre la temperatura del agua embalsada y los factores climáticos (Adrian et al., 2009).

1.5. Análisis vertical de la calidad del agua.

La distribución del oxígeno disuelto a lo largo del perfil vertical de una masa de agua está estrechamente relacionada con las condiciones de mezcla o estratificación de las masas de agua. Aguas con una mezcla vertical intensa suelen presentar una distribución uniforme del oxígeno en toda la columna; mientras que capas superiores bien oxigenadas, consecuencia de procesos de fotosíntesis, y niveles profundos deficitarios en oxígeno, debido al consumo por respiración y oxidación de la materia orgánica que va sedimentando, son características de aguas estratificadas (Vidal, 1972). La variación del oxígeno a lo largo del perfil vertical y particularmente el déficit de oxígeno en el hipolimnion, ha venido siendo utilizado como un índice del grado de eutrofia de un lago (Moss, 1980).

En el caso concreto de los embalses, la aparición de unas condiciones reductoras, originadas como consecuencia de la falta de oxígeno en los niveles profundos, favorece el desarrollo de bacterias cuya actividad determina la acumulación de gases, como el sulfuro de hidrógeno y el metano, que pueden afectar a las estructuras de hierro y cemento (Armengol y Prat, 1979; Ambroggi, 1980; Margaleff, 1983), asimismo se producen cambios en el sedimento, como consecuencia de la presencia de sulfuro ferroso y de materia orgánica sin oxidar, todo ello conlleva un deterioro en la calidad del agua con los consiguientes problemas, entre los que no es posible descartar los de tipo sanitario (Margaleff, 1983). De ahí que la predicción del régimen del oxígeno sea una medida de sumo interés, no sólo a nivel teórico sino también por las implicaciones prácticas derivadas del control de la calidad de las aguas (Vollenweider y Janus, 1982).

1.6. Obras de toma flotantes. Definiciones.

Las obras de toma flotantes son elementos componentes de instalaciones de captación de agua en presas en situaciones especiales dada su distribución en los

diferentes órganos de desagüe. Su aplicación se basa en la mejora en la toma de agua en situaciones en las que el propio embalse no ofrece un abastecimiento de agua con calidad óptima por los motivos anteriormente desarrollados.

Actualmente existen dos vertientes principales en lo que respecta al diseño de obras de toma flotantes:

1- Las tomas flotantes mediante brazo articulado multifuncional (Figura 2.a)) se diseñan mediante una estructura metálica autorresistente con forma triangular o rectangular, conformada por tubos de distintos diámetros y espesores. Esta configuración tridimensional aporta resistencia a la flexión y a la torsión.

   Las tuberías longitudinales inferiores suelen emplearse como conducciones para el agua. Las tuberías superiores protegen el cableado de alimentación a las bombas, que se recomienda sean sumergibles.

   Las tomas cuentan con un flotador principal y tantos flotadores secundarios como grupos de bombeo. Los flotadores de las bombas están fijados entre sí y al flotador principal mediante uniones atornilladas, lo que permite el desmontaje-montaje selectivo. El flotador principal soporta el peso del brazo articulado de la toma, mientras que los flotadores secundarios soportan el peso de las bombas. Las bombas sumergibles están situadas bajo sus correspondientes flotadores en posición horizontal, incluyendo camisa de refrigeración y rejilla de aspiración. El especial diseño de las articulaciones permite el giro de la estructura en función del nivel de agua embalsada sin presentar fugas.

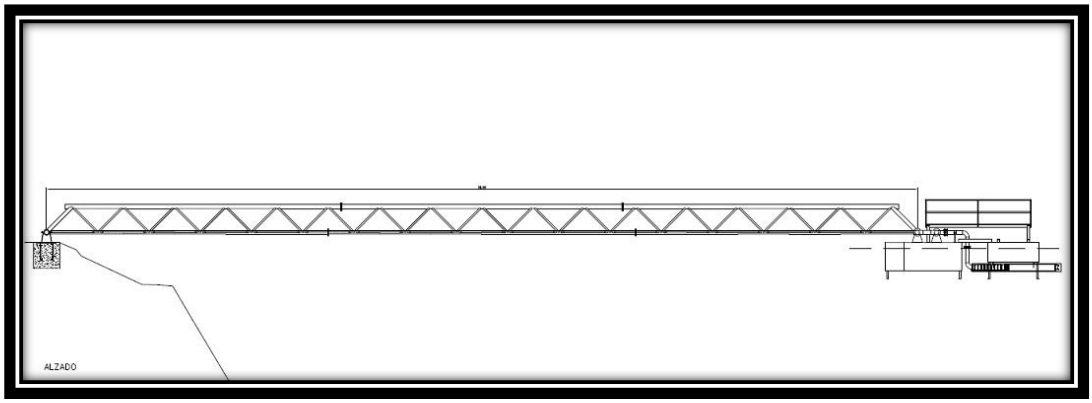

Figura 2.a) Variante 1 de Obra de Toma Flotante.

2- Estructuras flotantes que aprovechan las obras de toma de fondo de los embalses (Figura 2.b)). Esta variante, que es la más utilizada en nuestro país, consta de una compuerta metálica plana, dos “by pass” para la articulación entre la tubería de entrada y la toma de fondo. La tubería de entrada está unida por un cable trenzado de acero inoxidable a un flotante capaz de resistir las solicitaciones impuestas por la tubería y mantenerse en la superficie. La longitud del cable es la que define la profundidad de extracción del agua por la tubería. Además, se deben diseñar otros conjuntos para la extracción de aire y el sellado de la toma de fondo existente.

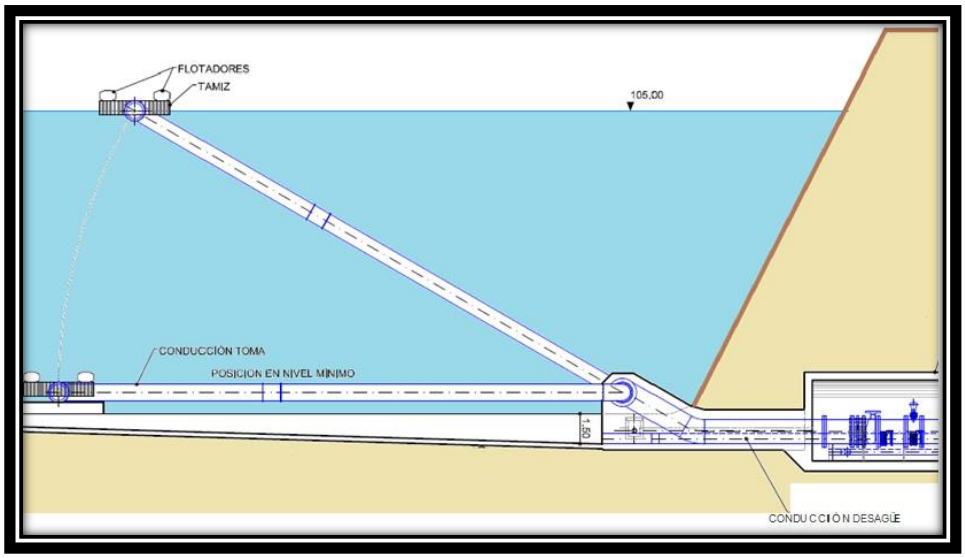

Figura 2.b) Variante 2 de Obra de Toma Flotante.

1.7. Estimaciones de costos de construcción.

En Cuba, en el sector de la construcción se emplea, mediante la Resolución número 199 del 2005 del Ministerio de Financias y Precios, el “Sistema de precios de la construcción” conocido como PRECONS II.

- **Organización del PRECONS II**

El Sistema de Precios de la Construcción, regula el método de formación de precios de la construcción, establece el contenido, formas de elaboración y presentación de los presupuestos de los servicios de construcción, montaje y otros de la construcción, que intervienen en la ejecución de la obra, y que sean convenidos (denominados en adelante *servicios de construcción*)*;* así como, en las etapas de conceptualización y de ejecución; además de definir los diferentes instrumentos para su utilización, análisis y aprobación.

El Sistema de Precios de la Construcción, que denominaremos en adelante PRECONS II**,** se reglamenta por la “Instrucción del Sistema de Precios de la Construcción” y se complementa por el conjunto de documentos mediante los cuales se determinan los recursos, costos y precios que permiten valorar los servicios de construcción y sirven de base para la programación y control de las obras.

La Instrucción del PRECONS II está complementada por los subsistemas o listas de costos y precios y el conjunto de procedimientos siguientes:

- Subsistema o lista de costos de renglones variantes.
- Lista de precios de materiales de construcción al cierre de la edición del PRECONS II.
- Lista de tarifas horarias de mano de obra.
- Lista de costos horarios de uso de equipos de la construcción.
- Subsistema o lista de indicadores técnico – económicos.
- Subsistema o lista de costos de unidades de obras genéricas y predeterminadas.
- Normas presupuestarias para el cálculo de los renglones variantes.

- Prontuario sobre el proyecto de organización de obras.
- Procedimiento para el cálculo del costo horario de uso de equipos.
- Procedimiento para el cálculo del costo total de las maquinarias que se emplean en la construcción.
- Procedimiento para el cálculo del costo total de las actividades de transferencias de recursos materiales y equipos a montar en obra.
- Procedimiento para el cálculo del costo total de las actividades de replanteo.
- Procedimiento para el cálculo de los gastos indirectos.

La lista de costos de renglones variantes contiene los preámbulos de los distintos sobregrupos y como parte de la lista de precios de materiales de la construcción se incluyen, en la misma, los productos semielaborados y los juegos de productos de la construcción considerados en las normas presupuestarias.

Estos documentos del PRECONS II son los oficialmente establecidos para la confección de la documentación presupuestaria en la formación del presupuesto o precio de la construcción y la certificación de estos servicios en todo el territorio nacional.

CAPÍTULO II. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Materiales.

a. Computadora con acceso a internet.
b. Programas de computación:
    - Microsoft Office 2010,
    - Autocad 2016,
    - Flowmaster VII, 2007;
    - Sketch Up 2018 y
    - Preswin 2005.
c. Fuentes de datos:
    - Bases de datos y archivos de proyectos de la Empresa de Aprovechamiento Hidráulico de Villa Clara (EAH-VC).
    - Base de datos de Calidad de Agua de la Dirección Provincial de Recursos Hidráulicos en Villa Clara (DPRH-VC).
    - Proyectos mecánicos de obras de toma flotantes para embalses de Villa Clara (para embalse Paso Bonito, Manicaragua y Minerva), realizados por la Empresa de Investigaciones y Proyectos Hidráulicos en Villa Clara (EIPH-VC), en el año 2003.
    - Búsqueda bibliográfica en internet.
    - Consulta de libros de la especialidad.
    - Entrevistas y consultas a especialistas del sector hidráulico con experiencia en temas estudiados en este trabajo.

2.2. Metodología empleada.

Para el desarrollo de este trabajo se definieron los siguientes componentes objeto de estudio:

a. Calidad del agua en embalses y su relación con las obras de toma flotantes;
b. Obras de toma flotantes, su clasificación y diseños existentes para los embalses bajo estudio;

y se realizaron las siguientes actividades:

a. Búsqueda bibliográfica sobre los temas objeto de estudio en esta tesis.
b. Establecimiento de criterios para la determinación del estrato de agua del embalse de mejor calidad para la toma de agua mediante obra de toma flotante.
c. Definición de los embalses de abasto a la ciudad de Santa Clara que necesitan la construcción obras de toma flotantes, basada en el comportamiento de la calidad del agua y análisis técnico de las estructuras de obra de toma, principalmente.
d. Evaluación de proyectos de obra de toma flotantes existentes para los embalses estudiados, con revisión y, caso necesario, realización de los cálculos hidráulicos pertinentes y estimación de costos de materiales y de construcción.
e. Diseño de propuesta de obra de toma, a nivel de esquema, con realización de sus cálculos hidráulicos y la estimación de sus costos de materiales y de construcción, para embalses en que sea necesario.

CAPÍTULO III. RESULTADOS

3.1. Análisis de las características morfométricas de los embalses analizados y sus obras de toma.

A continuación, se realizará un análisis de las principales características morfométricas y de las obras de toma de los embalses estudiados. El mismo, servirá para la toma de decisiones a la hora de definir la factibilidad técnica del empleo de obras de toma flotantes en los embalses objeto de estudio.

3.1.1. Características morfométricas de los embalses analizados.

- **Nivel de altitud.**

Los embalses de abasto a la ciudad de Santa Clara se dividen, analizando su altitud con respecto al nivel medio del mar, en tres grupos fundamentales. Primeramente, tenemos los embalses ubicados en zonas bajas como Minerva y Palmarito, luego tenemos los embalses Agabama y Gramal que se encuentran ubicados en pequeñas elevaciones y por último está el embalse Hanabanilla que se ubica en una zona montañosa, específicamente en el macizo Guamuhaya.(Tabla 1)

Tabla 1. Nivel de altitud de los embalses

Presa	Nivel de altitud (msnmm)
Hanabanilla	321.0
Minerva	49.0
Agabama	185.7
Gramal	211.7
Palmarito	83.1

- **Volumen.**

Cuando se analizan los embalses estudiados, atendiendo al volumen de agua embalsada, se puede resaltar que los embalses con mayor y menor volumen son Hanabanilla y Gramal, respetivamente, con una diferencia notable de 284.2 Hm^3 en sus capacidades. En la Tabla 2 se muestran los datos específicos de los cinco embalses objeto de estudio.

Tabla 2. Volúmenes de los embalses estudiados

Embalse	Volúmenes (Hm^3)			Volumen Útil (Hm^3)
	NAM	NAN	NM	
Hanabanilla	340.70	286.00	14.00	272.0
Minerva	195.60	123.00	5.00	118.0
Agabama	4.071	3.981	0.020	3.979
Gramal	2.157	1.794	0.006	1.788
Palmarito	83.231	78,731	1,403	77.8

- **Área de la cuenca.**

Analizando las cuencas de cada uno de los embalses objeto de estudio, teniendo en cuenta su expansión y la longitud de sus ríos principales, se puede afirmar que la cuenca del río Sagua la Chica, en la cual se encuentra ubicado el embalse Minerva es la de mayor área. En el otro extremo se tiene la cuenca del río Gramal en la que se encuentra emplazado el embalse del mismo nombre, siendo la diferencia entre estas dos cuencas de más de 300 Km^2. En la Tabla 3 se muestran los datos de todas las cuencas de los embalses estudiados.

Tabla 3. Área de la cuenca de los embalses estudiados

Embalse	Río Principal		Área Cuenca (km^2)
	Nombre	Longitud (km)	
Hanabanilla	Hanabanilla	26.6	191.6
Minerva	Sagua la Chica	32.5	313.0
Agabama	Agabama	11.7	17.6
Gramal	Gramal	7.45	8.0
Palmarito	Sagua la Grande	25.6	154.0

- **Área del espejo de agua.**

Cuando se analizan los embalses de abasto a la ciudad de Santa Clara con respecto al área del espejo de agua que presentan, en sus niveles más significativos, se conoce mejor la forma del embalse. De esa forma se tiene que el embalse Minerva es el que mayor área de espejo de agua posee para el nivel de aguas máximas (NAM), pero cuando analizamos para el nivel de aguas normales (NAN) es el embalse Hanabanilla el que alcanza la mayor área de espejo de agua (Tabla 4).

Tabla 4. Área del espejo del agua en los embalses analizados

Embalse	**Área (Km^2)**		
	NAM	**NAN**	**NM**
Hanabanilla	19.520	18.52	2.52
Minerva	24.81	18.00	1.25
Agabama	0.467	0.461	0.011
Gramal	0.364	0.326	0.004
Palmarito	11.76	11.38	0.5

- **Profundidad.**

Analizando los embalses de abasto a la ciudad de Santa Clara, con respecto a su profundidad se observa que, en su totalidad tienen más de 20 metros de profundidad media. Hanabanilla es el embalse más profundo y Gramal es el más somero. En la Tabla 5 se presentan los valores de profundidad media y máxima de los embalses objeto de estudio.

Tabla 5. Profundidades de los embalses analizados.

Presa	Profundidad (m)	Profundidad Max (m)
Hanabanilla	35.0	47.5
Minerva	33.0	38.0
Agabama	28.1	29.0
Gramal	20.5	22.1
Palmarito	26.5	29.0

- **Características del vaso.**

Para clasificar el tipo de vaso presente en un embalse se debe analizar, principalmente, su curva característica. Las curvas características son las que relacionan la cota del embalse con el volumen existente entre superficies (Washington-Sandoval, 2018). A continuación, se muestran las curvas características de los embalses de abasto a la ciudad de Santa Clara (Figura 3).

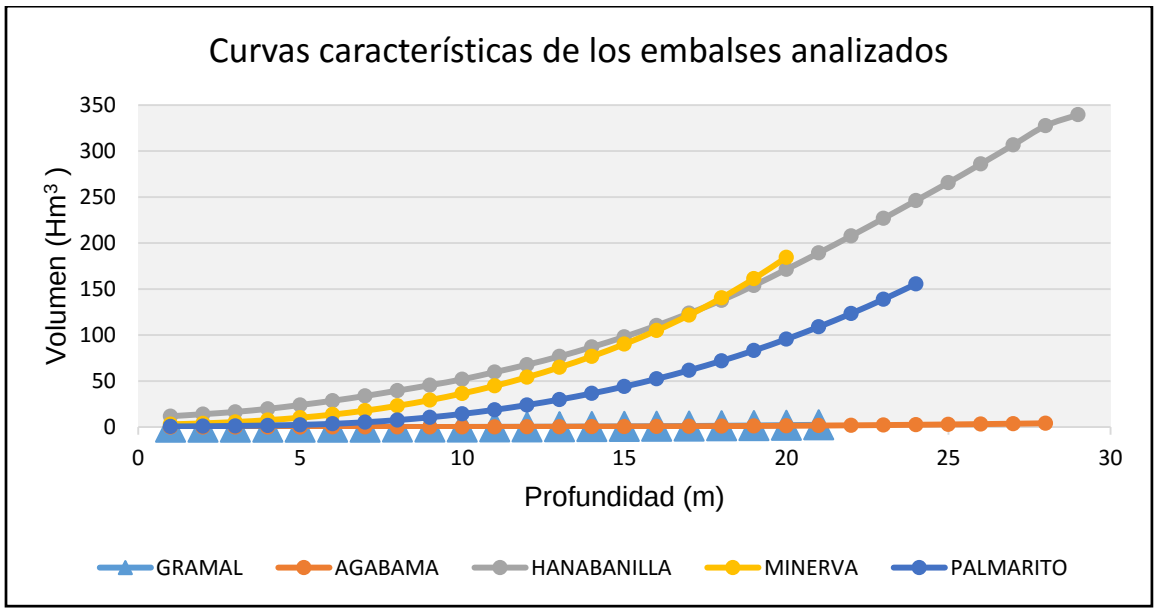

Figura 3. Curvas características de los embalses de abasto a la ciudad de Santa Clara.

A partir del análisis de las curvas características de los embalses objetos de estudio se clasificó el tipo de vaso correspondiente a cada uno de ellos (Tabla 6). Los vasos

en forma de V tienen menor volumen hipolimnético y alcanzan más rápidamente las condiciones anóxicas, con el consecuente deterioro de la calidad del agua.

Tabla 6 Clasificación del tipo de vaso de los embalses analizados.

Embalse	Tipo de Vaso
Hanabanilla	Forma de U
Minerva	Forma de U
Agabama	Forma de V
Gramal	Forma de V
Palmarito	Forma de U

3.1.2. Análisis de las obras de toma en los embalses analizados.

Para poder realizar un diseño de obras de toma flotantes a los embalses estudiados, es necesario analizar las especificidades de cada una de las obras de toma con que los mismos cuentan actualmente. Para ello, se analizaron datos proporcionados por la Empresa de Aprovechamiento Hidráulico de Villa Clara (EAH-VC) en los cuales se registran las características de diseño estructural e hidráulico de las obras de toma de los embalses, los que detallan a continuación.

- **Embalse Palmarito.**

El embalse Palmarito posee una obra de toma de fondo compuesta por dos galerías, (cada una de ellas con 2.8 metros de alto, 2.5 metros de ancho y 118.3 metros de largo), reguladas por compuertas y con una torre de control. La capacidad de entrega máxima de esta estructura de toma es de 52 m^3/s. Este embalse entrega anualmente a la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Villa Clara (EAA-VC) un volumen de 18.9 Hm^3 para la población de la ciudad de Santa Clara.

Actualmente, en este embalse no se está realizando el abasto a la población por esta toma de fondo, sino por una toma que se construyó en la cola del embalse, en las coordenadas 265.92 N y 598.84 E. En dicha toma se construyeron pozos en los

cuales se puede realizar la extracción desde el nivel máximo del embalse (80 Hm^3), hasta que un nivel que se corresponde con un volumen de 22 Hm^3.

- **Embalse Minerva.**

El embalse Minerva posee una obra de toma de fondo bastante similar a la de Palmarito. La misma se encuentra ubicada en las coordenadas 289.8 N y 624.04 E y está compuesta por dos galerías de 3.5 metros de alto, tres metros de ancho y 165.8 metros de largo. Además, cuenta con dos tuberías a presión (una dentro de cada galería) con diámetro 1200 mm y una longitud de 74 metros. La capacidad de entrega máxima de esta estructura es de 30 m^3/s. Este embalse entrega anualmente a la EAA-VC un volumen de 19.08 Hm^3.

En este embalse actualmente se utilizan las dos galerías, la izquierda se utiliza para captar agua, con destino al consumo humano y la derecha se utiliza para captar agua con destino al riego agrícola y la piscicultura.

- **Embalse Gramal.**

El embalse Gramal cuenta con una obra de toma de fondo ubicada en las coordenadas 274.2 N y 615.5 E. La misma consta de un pozo con válvula y dos tuberías a presión con diámetros de 14’’.

Este embalse tiene como particularidad que se utiliza como un trasvase hacia el embalse Agabama que se encuentra aguas abajo. Este proceso se realiza por gravedad, es decir, sin necesidad alguna de bombeo. Es importante decir que el único destino del agua de este embalse es para el consumo humano en la ciudad de Santa Clara.

- **Embalse Agabama.**

El embalse Agabama cuenta con una obra de toma selectiva, ubicada en las coordenadas 272.8 N y 615.1 E. La misma cuenta con una torre con compuertas ubicadas a diferentes alturas que permiten extraer el agua a distintos niveles de llenado del embalse. Cada una de las compuertas cuenta con una tubería de 16’’ de diámetro. Este embalse entrega anualmente a la EAA-VC un volumen de

7.25 Hm^3, siendo el abasto a la población el único objetivo de este embalse. La entrega de este reservorio, se hace por gravedad hasta una cota intermedia y por bombeo a partir de la misma.

- **Embalse Hanabanilla.**

El embalse Hanabanilla cuenta con una obra de toma (conformada por una torre con pozo) destinada a la generación de energía en la central hidroeléctrica más antigua del país. Además, cuenta con un conducto de derivación conformado por una galería con tubería a presión (18'' de diámetro) y válvulas que es el encargado de llevar el agua desde Hanabanilla hasta el embalse Paso Bonito, que es el encargado de entregar el agua para el consumo humano a Santa Clara.

3.2. Análisis multifactorial de la factibilidad técnica para la construcción de obras de toma de fondo en los embalses bajo estudio.

- **Embalse Hanabanilla**:

Su obra de toma, diseñada para la generación de electricidad, dificulta la instalación de una obra de toma flotante. Además, aún está en estudio la factibilidad de extraer agua directamente de la obra de toma de forma independiente para las ciudades de Cienfuegos y Santa Clara, para las que se han diseñado dos conductoras por gravedad independientes, con una hidroeléctrica a construir en su trayecto, aguas abajo de la toma. El agua que se entregaría a estas ciudades sería del fondo, y por tanto de la peor calidad, pero la misma debe sufrir cambios favorables en su trayecto hacia las ciudades, principalmente por oxigenación.

Atendiendo a esta situación, se considera que en este embalse no es necesaria la construcción de una obra de toma flotante.

- **Embalses Agabama-Gramal:**

Dado que la obra de toma del embalse Agabama, por donde se extrae también el agua del embalse Gramal, fue construida con tomas selectivas, a tres niveles, pudiendo tomarse agua de calidad apropiada.

Se considera que en este embalse no es necesaria la instalación de una obra de toma flotante. Se recomienda la rehabilitación de la obra de toma existente, a fin de poder extraer la mejor calidad posible de este embalse.

- **Embalse Minerva:**

Este embalse tiene una estructura de obra de toma de fondo con características que permiten la construcción de una toma flotante acoplada directamente a la toma de fondo. La EIPH-VC tiene proyectada esta obra de toma flotante (tomaflow). Se obtuvo el proyecto mecánico, pero no fue posible encontrar el proyecto hidrotécnico, por lo que fueron realizados los cálculos hidráulicos de este proyecto.

- **Embalse Palmarito:**

Este embalse tiene construida una obra de toma con una estación de bombeo, en el área de la cola del embalse, por la cual es que se entregan los volúmenes necesarios para el abasto a la ciudad de Santa Clara. Esta toma tiene la limitante de que solo capta una parte del agua disponible, por lo que los planes definitivos de toma de agua deben ser realizados por la obra de toma de fondo originalmente construida y a la que le falta terminación de una de las tuberías a presión de salida del agua., Por la obra de toma original sería entregada el agua de abasto para las ciudades de Ranchuelo, Esperanza, Jicotea y Santa Clara.

En este caso, se diseña el proyecto hidrotécnico de un sistema de obra de toma flotante conectada a la obra de toma de fondo del embalse.

3.3. Determinación de la profundidad más adecuada para la captación del agua en los embalses analizados.

Para determinar la profundidad más adecuada se considera el comportamiento estacional de los siguientes aspectos:

- Transparencia promedio del agua del embales para período seco y húmedo.
- Comportamiento vertical y estacional de la calidad del agua (perfiles), principalmente de temperatura y oxígeno disuelto.

- **Comportamiento vertical de la temperatura del agua y el contenido de oxígeno disuelto en los embalses de abasto a Santa Clara.**

La temperatura es el factor principal en la formación de la estratificación térmica, mientras que el oxígeno disuelto es un parámetro de calidad esencial que influye en la calidad del agua de los diferentes estratos.

La transparencia, medida con el uso del disco Secchi, es el primer criterio considerado a fin de establecer la profundidad a la cual debe ser tomada el agua en cada embalse. Los valores promedio de la transparencia para los embalses estudiados se muestran en las figuras 4.a), 4.b) y 4.c).

Los perfiles de temperatura obtenidos en los embalses Hanabanilla, Minerva y Palmarito muestran que Hanabanilla y Minerva, tienen una termoclina bien definida, mientras que en el caso de Palmarito no puede decirse que exista una estratificación térmica definida, debido a su menor profundidad máxima en la toma de cola actualmente en explotación. En la toma principal la profundidad máxima es de 26,5 m, existiendo condiciones para la estratificación térmica.

A continuación, se muestran los datos de estudios realizados por la Delegación de Recursos Hidráulicos de Villa Clara sobre la variación de la temperatura con la profundidad de los embalses Hanabanilla, Minerva y Palmarito (Figuras 4.a), 4.b) y 4.c))

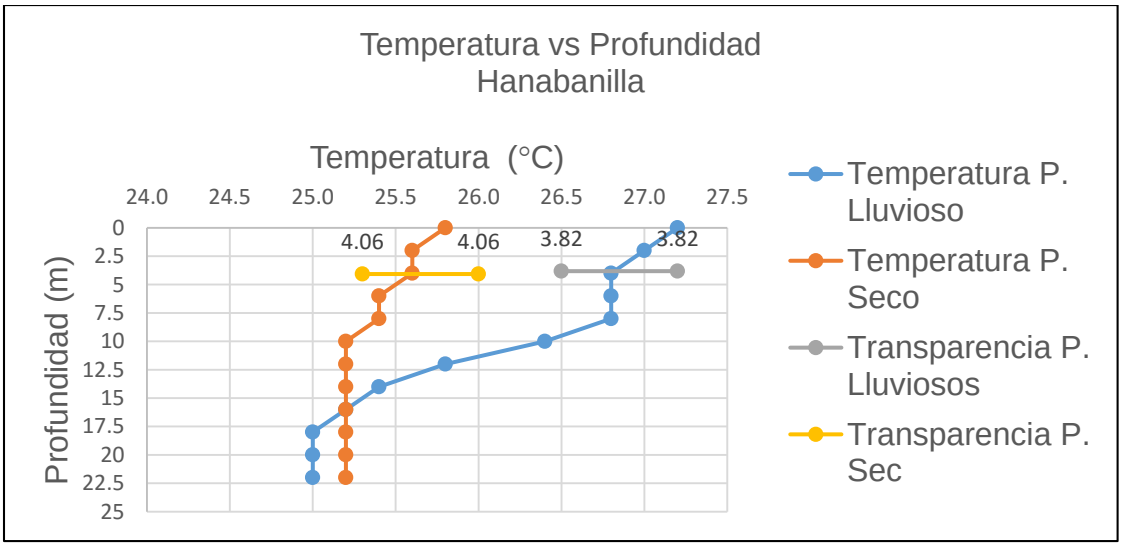

Figura 4.a) Cambios de temperatura en la profundidad del Embalse Hanabanilla.

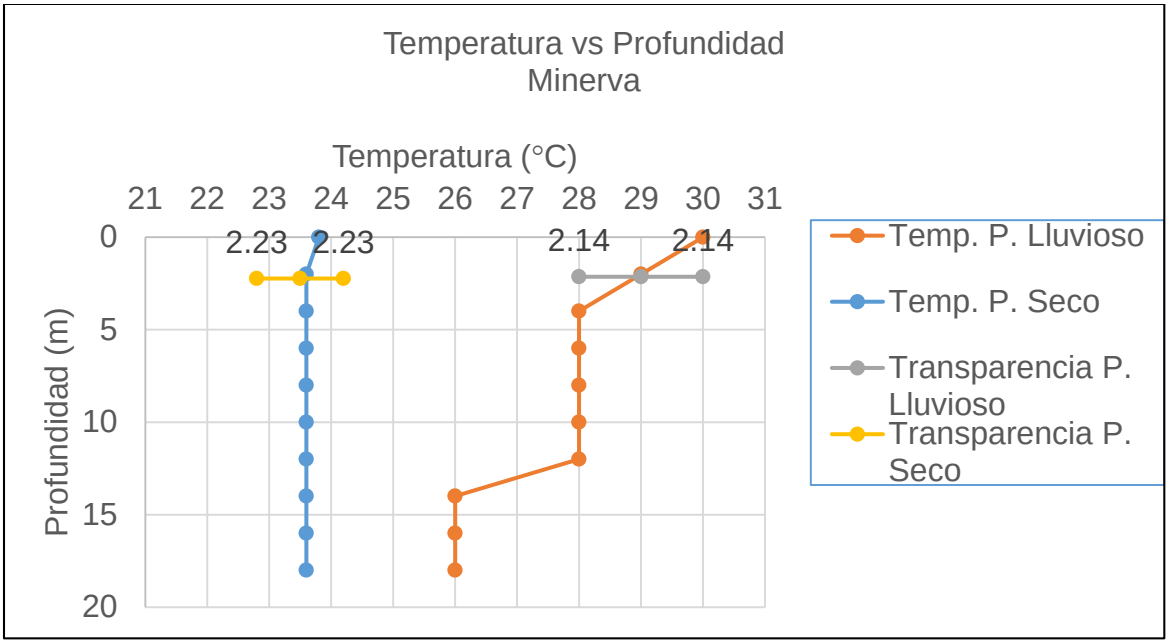

Figura 4.b) Cambios de temperatura en la profundidad del Embalse Minerva.

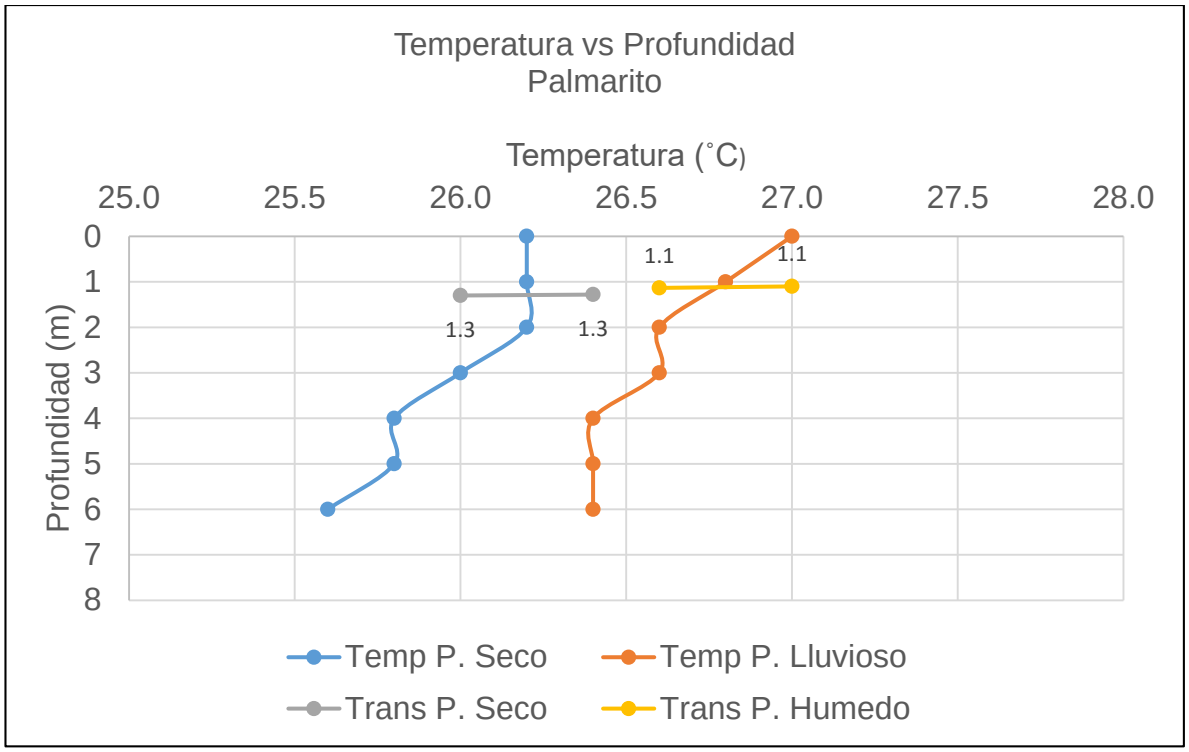

Figura 4.c) Cambios de temperatura en la profundidad del Embalse Palmarito.

Se tomaron datos de la REDCAL que recogen, desde el año 2006, un muestreo del comportamiento del oxígeno disuelto en el perfil vertical de los diferentes embalses objeto de estudio, durante los periodos de sequía y de lluvias. (Figuras 5. a), 5.b) y 5.c))

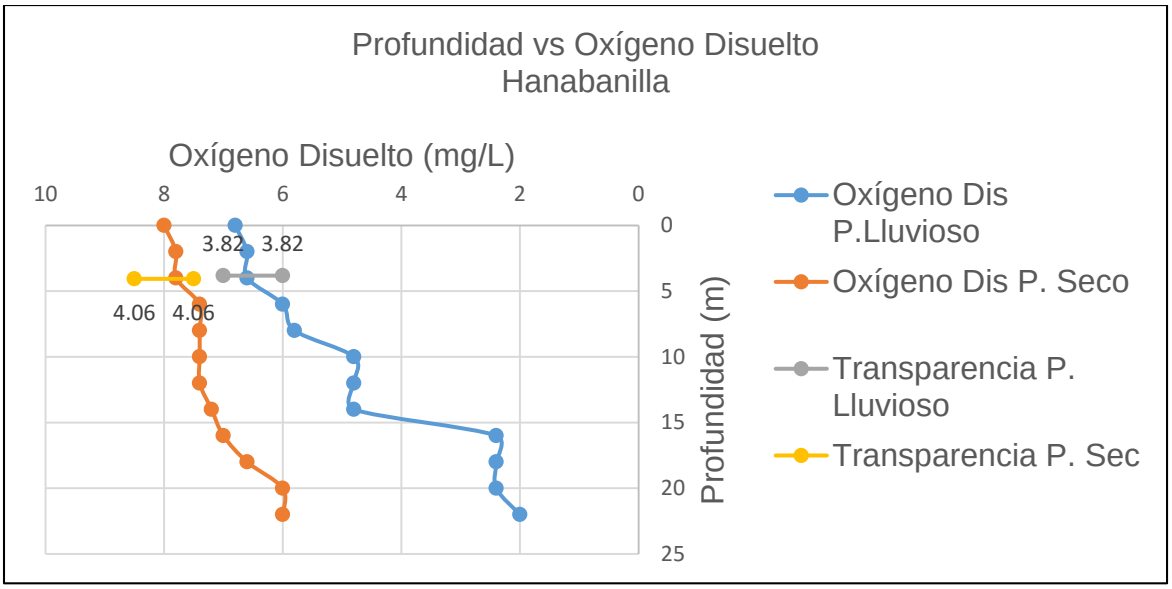

Figura 5.a) Comportamiento del Oxígeno disuelto en el Embalse Hanabanilla.

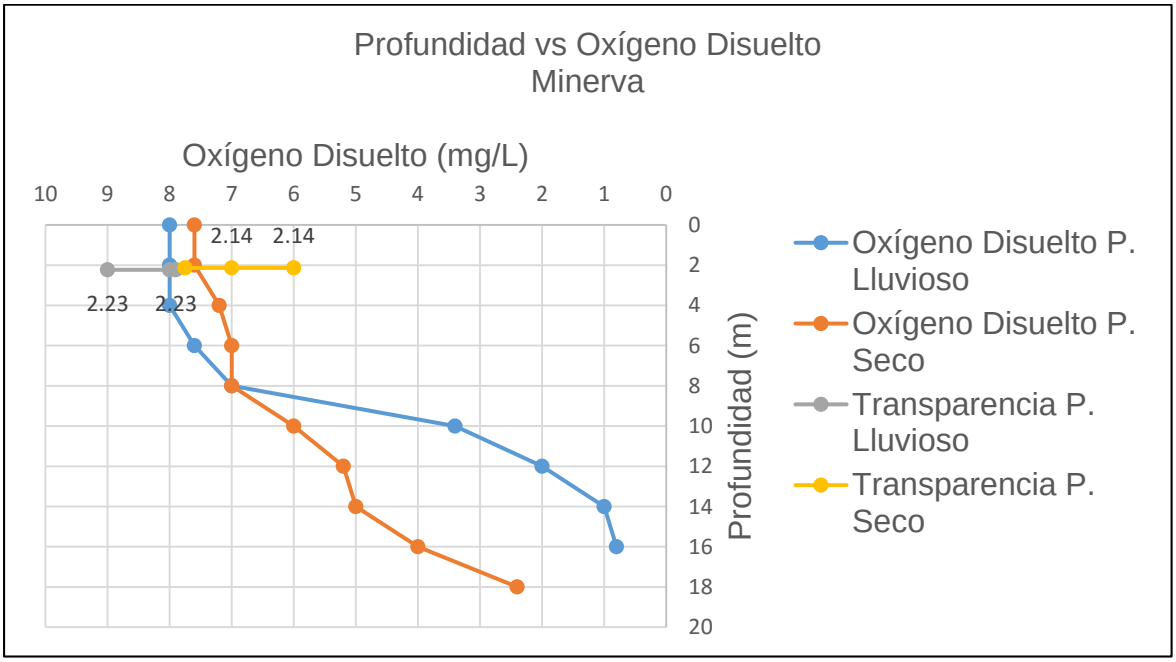

Figura 5.b) Comportamiento del oxígeno disuelto en el Embalse Minerva.

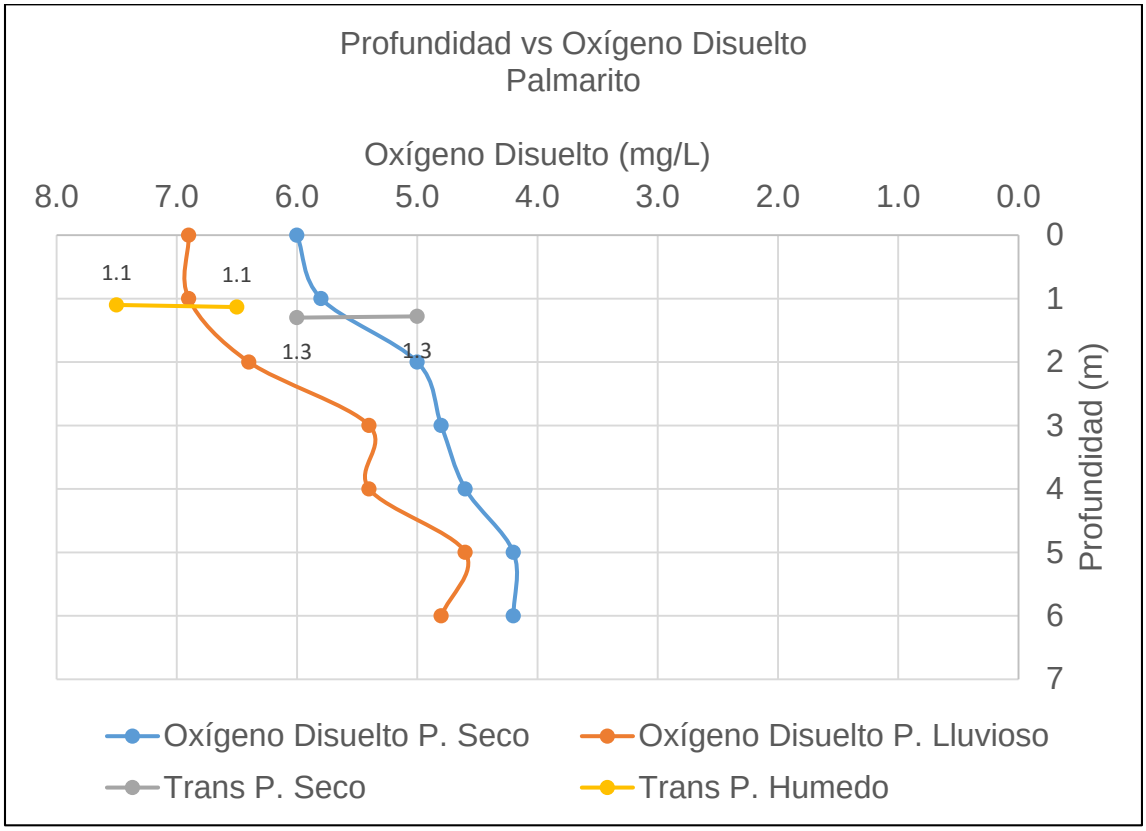

Figura 5.c) Comportamiento del oxígeno disuelto en el Embalse Palmarito.

3.3.1. Calidad del agua a la salida de las tomas de fondo de los embalses de abasto a la ciudad de Santa Clara.

Se tomaron datos de la Red de Calidad de las Aguas (REDCAL) del Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos que recogen muestras de la calidad de las aguas, extraídas por la toma de fondo de los embalses de abasto a la ciudad de Santa Clara. En dicha muestra se registran datos de los principales parámetros de calidad del agua desde el año 1975, dividiendo los datos por periodos secos y lluviosos.

A continuación, se realiza un análisis de la muestra seleccionada y se comparan sus valores con los establecidos por la Norma Cubana NC 1021 del 2014. (Figuras 6.a) y 6.b))

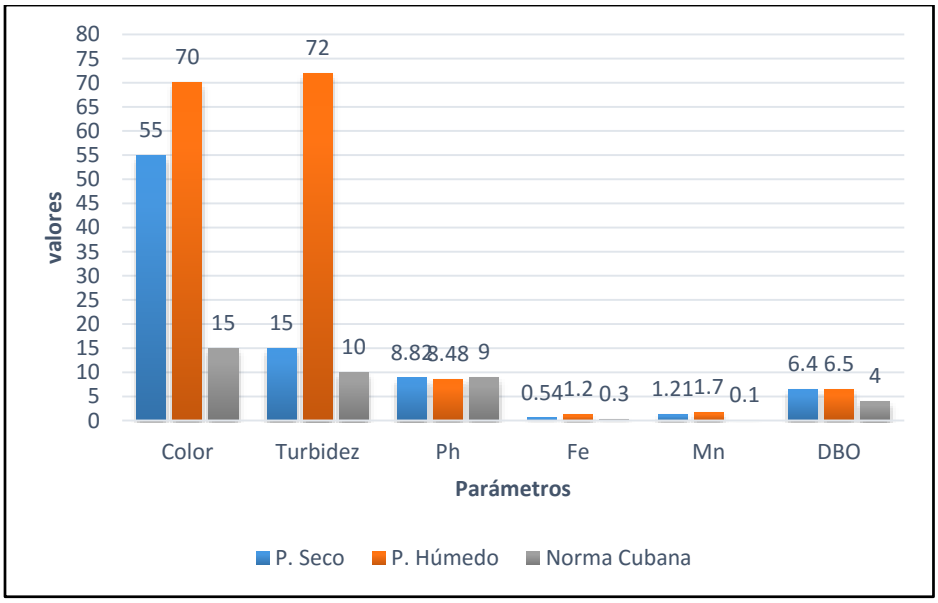

Figura 6. a) Parámetros físico-químicos.

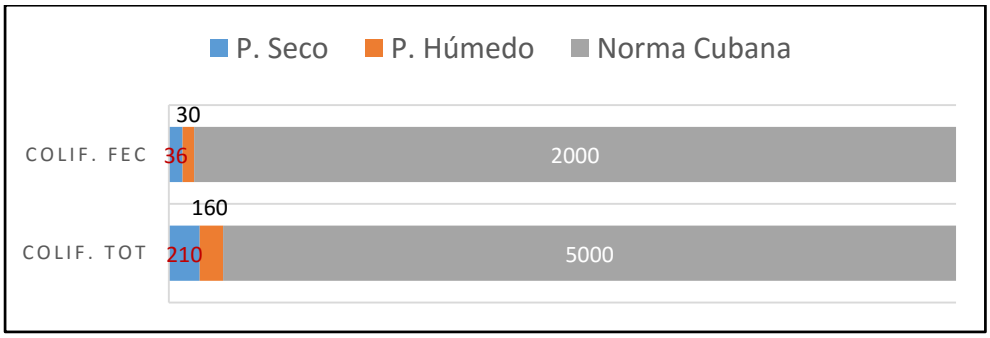

Figura 6. b) Parámetros biológicos.

3.3.2. Profundidades propuestas para la toma de agua en los embalses analizados.

Para determinar la profundidad más adecuada de extracción del agua por el “tomaflow” se compararon los valores de la transparencia de los embalses en el periodo más crítico multiplicándola por 2 (debido a que el valor de transparencia determinado por el disco de Secchi no representa en su totalidad los valores de penetración de la luz) y comparando su valor con la profundidad del inicio de la termoclina. En la Tabla 7 se muestran los datos de dicha comparación.

Tabla 7. Comparación de parámetros para determinar la profundidad de extracción

Embalse	Transparencia (m)	Transparencia * 2 (m)	Profundidad Termoclina (m)
Minerva	2.14	4.28	4
Palmarito	1.1	2.2	2

A la hora de determinar el valor definitivo, luego de analizar los datos de la Tabla 7 se propone seleccionar el mayor valor de profundidad para el caso particular de cada embalse, con el objetivo de evitar así las algas que habitan en los estratos donde penetra la luz solar.

3.4. Cálculo hidráulico de las obras de toma flotantes de los embalses analizados.

A continuación se realizará el cálculo hidráulico de las obras de toma flotantes de los embalses Minerva y Palmarito con el objetivo de determinar los diámetros de las tuberías y accesorios necesarios y además, determinar los niveles necesarios para el correcto funcionamiento de las obras de toma flotantes.

3.4.1. Embalse Minerva.

En este caso, por no existir los cálculos originales del proyecto hidrotécnico “Toma flotante para la Presa Minerva”, realizado por la Empresa de Investigaciones y Proyectos Hidráulicos de Villa Clara, en el año 2003, se rehicieron todos los cálculos hidráulicos, empleando los datos del proyecto mecánico con título “Toma Flotante Presa Minerva” elaborado por el Grupo de Electricidad y Mecánica de la Empresa de Investigaciones y Proyectos Hidráulicos de Villa Clara en el año 2003.

Para realizar el cálculo del “tomaflow” de este embalse se tomaron las siguientes consideraciones:

- Las presiones iniciales y finales en las tuberías son cero, ya que el agua será captada según régimen libre y será depositada en una piscina con igual régimen, antes de llegar a las bombas.

- Se realizó el cálculo en el momento más crítico de la operación de la toma, que es cuando el embalse está en su nivel mínimo aprovechable (nivel para el volumen muerto).
- Las tuberías emplazadas en la galería son de acero, con un tiempo de explotación de más de 30 años, asignándose un coeficiente de rugosidad de 107.00.
- Las tuberías del “tomaflow” serán de acero, con un coeficiente de rugosidad de 130.00.
- El caudal con que operará la obra de toma será el necesario para satisfacer las demandas de riego, de la cría de alevines en estanques aguas abajo del embalse y del abasto a la ciudad de Santa Clara (8 150 m^3/s).

En la Figura 7 se muestra un esquema de cálculo del proyecto en cuestión realizado mediante el Software Sketch Up 2018.

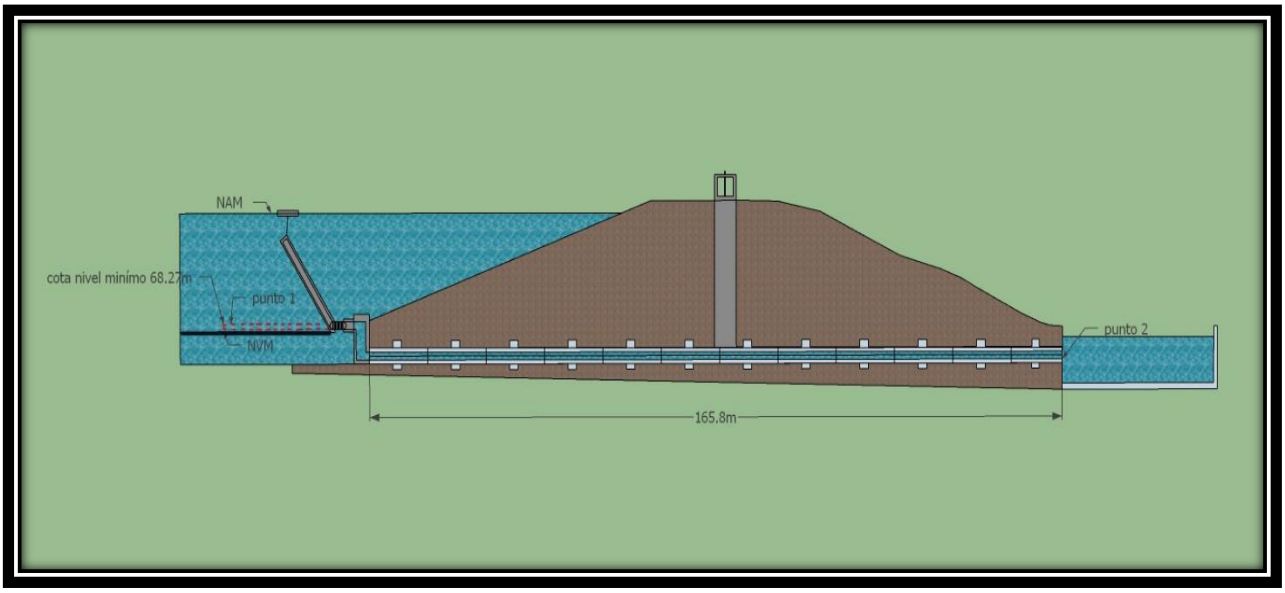

Figura 7. Esquema de cálculo del Proyecto de Toma Flotante del embalse Minerva.

Para recalcular el diámetro de las tuberías, la cota mínima de succión en el embalse y la velocidad del agua en las tuberías se utilizó la ecuación de Bernoulli.

$$\frac{P_1}{pg} + Z_1 + \frac{{V_1}^2}{2g} = \frac{P_2}{pg} + Z_2 + \frac{{V_2}^2}{2g} + hf_{1-2}$$ *Ecuación de Bernoulli*

A continuación se presentan los resultados obtenidos del desarrollo de los cálculos en la Tabla 8.Para la comprobación de los resultados se utilizó el Software Flowmaster VII.

Tabla 8 Cálculo Hidráulico de la Toma Flotante del Embalse Minerva.

Presión Inicial	0.00	Coef. Rugosidad	107.00 Galería 130.00 “Tomaflow”
Presión Final	0.00	Diámetro	1200 mm
Cota Nivel Mín.	68.27 m	Caudal	8150.00 L/s
Cota Eje de Bomba	65.00 m	Pérdidas	3.27 m
Longitud de Tuberías	260.00 m	Velocidad	4.61 m/s

Para el cálculo del diámetro de los By Pass del “tomaflow” se utilizó como base la ecuación de pérdidas de Hazen-Williams para establecer una relación entre el diámetro de la tubería principal del “tomaflow” (D1) y el diámetro de los dos “by pass” (D2).

$$\left(\frac{279054.67 * Q}{C * D1^{2.63}}\right)^{1.85185} * L1 = \left(\frac{279054.67 * Q}{C * 2 * D2^{2.63}}\right)^{1.85185} * L1$$

De la solución de esta ecuación se logró obtener el diámetro de los “by pass” que se llevó a una dimensión de diámetros comerciales y el resultado fue de 921 mm.

3.4.2. Embalse Palmarito.

En el caso del Embalse Palmarito, no existía anteriormente ningún proyecto de obra de toma flotante realizado. Por las características de su obra de toma de fondo se realizó un diseño de obra de toma flotante de tipo 2 (Adaptándose a la toma de fondo existente en el embalse).

Para el cálculo de los diámetros del “tomaflow” y de la tubería que se colocará dentro de la galería se tomaron las siguientes consideraciones:

- Las presiones iniciales y finales en las tuberías son cero, ya que el agua será captada según régimen libre y será depositada en una piscina con igual régimen, antes de llegar a las bombas.
- Se realizó el cálculo en el momento más crítico de la operación de la toma, que es cuando el embalse está en su nivel mínimo aprovechable (nivel para el volumen muerto).
- Como el único objetivo de esta obra de toma será captar agua para el abasto a la población, el caudal a satisfacer será la demanda de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Villa Clara, que en el caso de este embalse es de 820 L/s (este caudal incluye los planes futuros de abastecer por medio de este embalse a los poblados de Ranchuelo, La Esperanza y Jicotea).
- Las tuberías del “tomaflow” son de acero con un coeficiente de rugosidad de 130.

En la Figura 8 se muestra un esquema de cálculo del proyecto en cuestión realizado mediante el Software Sketch Up 2018.

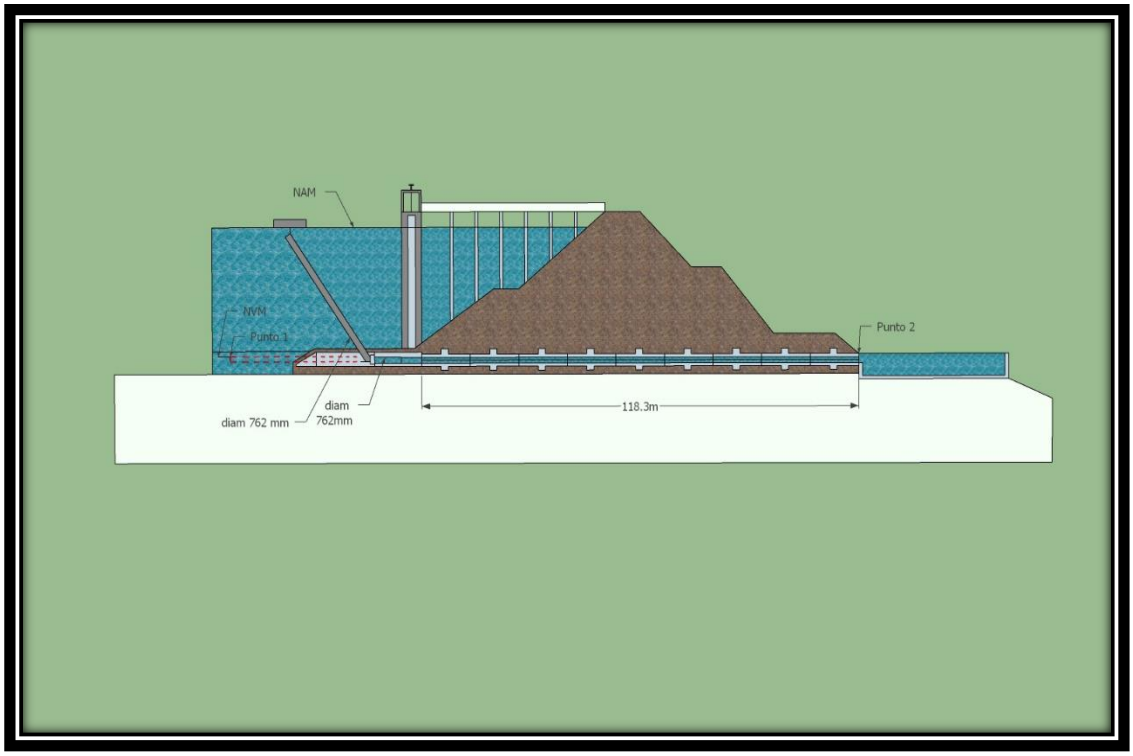

Figura 8. Esquema de cálculo del Proyecto de Toma Flotante del embalse Palmarito

Se realizó el cálculo hidráulico utilizando la ecuación de Bernoulli con el objetivo de determinar el diámetro de las tuberías, la cota mínima de succión en el embalse y la velocidad del agua en las tuberías.

$$\frac{P_1}{pg} + Z_1 + \frac{{V_1}^2}{2g} = \frac{P_2}{pg} + Z_2 + \frac{{V_2}^2}{2g} + hf_{1-2}$$ *Ecuación de Bernoulli*

Para calcular las pérdidas se utilizó la ecuación de Hazen-Williams.

$$hf = \frac{10.649 * L}{D^{4.87}} * \left[\frac{Q}{C_{W-H}}\right]^{1.852}$$ *Ecuación de pérdidas de Hazen-Williams*

A continuación se presentan los resultados obtenidos del desarrollo de los cálculos en la Tabla 9.Para la comprobación de los resultados se utilizó el Software FlowMaster VII, 2007.

Tabla 9. Cálculo Hidráulico de la Toma Flotante del Embalse Palmarito.

Presión Inicial	0.00	Coef. Rugosidad	130.00
Presión Final	0.00	Diámetro	762 mm
Cota Nivel Mín.	94.35 m	Caudal	820.00 L/s
Cota Eje de Bomba	93.50 m	Pérdidas	0.85 m
Longitud de Tuberías	181.00 m	Velocidad	2.06 m/s

Para el cálculo del diámetro de los “by pass” del tomaflow se utilizó como base la ecuación de pérdidas de Hazen-Williams para establecer una relación entre el diámetro de la tubería principal del tomaflow (D1) y el diámetro de los dos “by pass” (D2).

$$\left(\frac{279054.67 * Q}{C * D1^{2.63}}\right)^{1.85185} * L1 = \left(\frac{279054.67 * Q}{C * 2 * D2^{2.63}}\right)^{1.85185} * L1$$

De la solución de esta ecuación se logró obtener el diámetro de los “by pass” que se llevó a una dimensión de diámetros comerciales y el resultado fue de 610 mm.

3.5. Listado de materiales.

Para realizar el listado de materiales se utilizó como base el cálculo hidrotécnico realizado anteriormente para los embalses Minerva y Palmarito. Cabe destacar que

se conoce que para llevar a cabo este proyecto es necesario realizar un análisis mecánico para completar el diseño.

3.5.1. Proyecto del Embalse Minerva.

A continuación, se describe el listado de materiales para el proyecto del embalse Minerva:

- Se necesitará tubería de 1200 mm de diámetro, para una longitud de 52.9 m.
- Dos “by pass” conformados por tuberías semicirculares (con un radio de 1.5m) de 920 mm de diámetro.
- Dos tuberías en forma de Tee con un diámetro de 1200 mm.

3.5.2. Proyecto del Embalse Palmarito.

Para realizar el proyecto del embalse Palmarito serán necesarios los siguientes materiales:

- Tubería de 762 mm de diámetro, para una longitud de 181 m.
- Dos “by pass” conformados por tuberías semicirculares (con un radio de 1.25 m) de 610 mm de diámetro.
- Dos tuberías en forma de Tee con un diámetro de 762 mm.

3.6. Cálculos económicos.

Para realizar los costos de los proyectos realizados se empleó el Software PRESWIN 2005. Se dividieron los costos por las actividades principales en cada embalse, para el entubamiento de las galerías, la construcción y el montaje de las tomas flotantes.

- **<u>Proyecto Minerva.</u>**

Costo del entubamiento de la galería con tuberías de 1200 mm de diámetro:

183 889. 71 CUP

Costo de construcción y montaje de la Toma Flotante:

131 640. 12 CUP

Costo total del proyecto:

315 529. 83 CUP

- **Proyecto Palmarito**

Costo del entubamiento de la galería con tuberías de 762 mm de diámetro:

236 973. 34 CUP

Costo de construcción y montaje de la Toma Flotante:

115 520. 08 CUP

Costo total del proyecto:

352 493. 42 CUP

CONCLUSIONES

1. Todos los embalses de abasto de la ciudad de Santa Clara presentan estratificación térmica, por lo que la calidad del agua del fondo es la peor del embalse.
2. La obra de toma del embalse Agabama es del tipo selectiva, adecuada para la toma de agua a distintos niveles de la columna de agua.
3. En el embalse a Hanabanilla existe una obra de toma de fondo, construida principalmente para la generación de energía en la Central Hidroeléctrica. Además, este embalse cuenta con un trasvase al embalse Paso Bonito que es el encargado de distribuir el agua para abasto a la población.
4. Los embalses Minerva y Palmarito cuentan con obras de toma de fondo bastante similares, con galería dobles con tuberías a presión en su interior.
5. No se considera necesario la instalación de obras de toma flotantes en los embalses Hanabanilla y el sistema Agabama-Gramal.
6. Se realizaron los cálculos hidrotécnicos a partir del proyecto mecánico de la obra de toma flotante diseñada para el embalse Minerva por la EIPH-VC.
7. Se realizó el proyecto hidrotécnico de instalación de una obra de toma flotante acoplada a la toma principal del embalse Palmarito.
8. El costo total del proyecto hidrotécnico de la instalación de la obra de toma flotante para el embalse Minerva fue estimado en 315 529.83 CUP.
9. El costo total del proyecto hidrotécnico de la instalación de la obra de toma flotante para el embalse Palmarito fue estimado en 352 493.42 CUP.

RECOMENDACIONES

1. Rehabilitar la obra de toma selectiva del embalse Agabama (sistema Agabama-Gramal).
2. Desarrollar el proyecto técnico ejecutivo para la obra de toma flotante diseñada en este trabajo para el embalse Palmarito.
3. Se recomienda a la Empresa Constructora de Obras Marítimas de La Habana para la realización de los trabajos de construcción de este proyecto.

BIBLIOGRAFÍA

1 Ambroggi, P. P. (Ed.) (1980) *Water.* New York, EE. UU.: Sci. American, 166 pp.

2 Armengol, J. y Prat, N. (Eds.) (1979) *Els ernbassarnents.* New York, EE. UU.: Quad Ecology, 85 pp.

3 Bollman, H. A., Carneiro, C. y Pergorini, E. S. 2005. (Cap. 7 Qualidade da Água e Dinâmica de Nutrientes). En*:* Bollman, H. A., Carneiro, C. y Pergorini, E. S. (Eds.) *Gestão Integrada de Mananciais de Abastecimento Eutrofizados.* pp. 500. Curitiba, Brasil: Gráfica Capital, LTDA.

4 Esteves, F. A. (Ed.) (2011) *Fundamentos de Limnologia.* Rio de Janeiro, Brasil: Interciência, 826 pp.

5 Hutchison, E. G. (Ed.) (1957) *Atreatise on Limnology* Nueva York, EE. UU.: Wiley Intersience Publication, 757 pp.

6 INSMET. 2019. *Clima, Santa Clara* [En línea]. Disponible desde: http://www.insmet.cu [Consultado: 23 de mayo]

7 Jaime-Jáquez, C., Arreguin-Cortés, F. I., Campos-López, J., Cantú-Suárez, M. A., Herrera-Toledo, C., Ramos-Valdes, C. O., Coll-Carabias, C. L. y Pinzón-Lizárraga, S. (Eds.) (2002) *Obras de toma. Manual de diseño de agua potable, alcantarillado y saneamiento.* Mexico: Comisión nacional del agua, 189 pp.

8 Margaleff, R. (Ed.) (1983) *Limnología.* Barcelona, España: Inv. Ciencia, 915 pp.

9 Martinez-Menez, M., Fernandez-Reynoso, D., Uribe-Chavez, D. Y., Jimenez-Vazquez, G. y Medina-Martinez, A. (Eds.) (2005) *Obras de toma para aprovechamientos hidráulicos.* Montecillo, México: Unidad Técnica Especializada (UTE) COUSSA, 21 pp.

10 Moss, B. (Ed.) (1980) *Ecology of fresh waters.* Oxford, Reino Unido: Blackwell Scientific Publications, 332 pp.

11 Oficina-Nacional-de-Normalización (2012) NC 827 Agua Potable — Requisitos Sanitarios. NC: 827-2012**:** 12 pp. La Habana, Cuba:Oficina Nacional de Normalización (NC).

12 OMS (2006) Guías para la calidad del agua potable. *OMS,* 408 pp. Genéve, Suiza:OMS.

13 Porto, M. F. A., Branco, S. M. y Luca, S. J. (Eds.) (1991) *Caracterização da Qualidade da Água.* São Paulo, Brasil: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 264 pp.

14 Silva-Pereira, A. E. (2008) Influência da precipitação na qualidade da água do Rio Purus. *Acta Amazonica,* 38**:** 734.

15 Souza, P. A. 2001. (Importância do uso de bioindicadores de qualidade: o caso específico das águas.). En*:* Felicidade, N. (Ed.) *Uso e Gestão dos recursos hídricos no Brasil.* pp. 55-66. Sao Carlos, Brasil: Rima.

16 Takasu, S. y Hirose, T. 2002. (Water intake structures for surface and subsurface waters.). En*:* Takasu, S. y Hirose, T. (Eds.) *Water storage, transport and disribution.* pp. 1-6. Tokio, Japon: University of Tokio.

17 Tundisi, J. G. y Matsumura-Tundisi, T. (Eds.) (2008) *Limnologia.* São Paulo, Brasil: Oficina de Textos, 631 pp.

18 Vidal, A. (Ed.) (1972) *Dinámica del hipolimnion anóxico en el embalse de Sau (Barcelona).* Barcelona, España: Pirineos, 169 pp.
19 Vollenweider, R. A. y Janus, L. L. (Eds.) (1982) *Statistical models far predicting hypolimnetic oxygen depletion rates.* Londres, Reino Unido: Mem. 1st. Ital. Idrobiol, 124 pp.
20 Von-Sperling, M. (Ed.) (2005) *Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgoto.* Belo Horizonte, Brasil: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental - Universidade Federal de Minas Gerais, 658 pp.
21 Wetzel, R. G. (Ed.) (2001) *Limnology. Lakes and River Ecosystems.* San Diego, California: Academic Press, 1014 pp.
22 Wetzel, R. G. y Likens, G. E. (Eds.) (2000) *Limnological Analises.* Nueva York, EE. UU: Springer-Verlag, 430 pp.