

**MODELACIÓN DE PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS DEL EMBALSE
PAO CACHINCHE UTILIZANDO LA REFLECTANCIA SUPERFICIAL
DESDE IMÁGENES DEL SATÉLITES LANDSAT**



**UNIVERSIDAD DE CARABOBO
ÁREA DE ESTUDIOS DE POSTGRADO
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE MAESTRÍA EN INGENIERÍA AMBIENTAL**

**MODELACIÓN DE PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS DEL
EMBALSE PAO CACHINCHE UTILIZANDO LA REFLECTANCIA
SUPERFICIAL DESDE IMÁGENES DEL SATELITES LANDSAT**

Autor: Abnel J Estaba Z
C: 3.700.843

Valencia, abril de 2019



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECCIÓN DE ESTUDIOS PARA GRADUADOS
SECCIÓN DE GRADO



ACTA DE DISCUSIÓN DE TRABAJO DE GRADO

En atención a lo dispuesto en los Artículos 137, 138 y 139 del Reglamento de Estudios de Postgrado de la Universidad de Carabobo, quienes suscribimos como Jurado designado por el Consejo de Postgrado de la Facultad de Ingeniería, de acuerdo a lo previsto en el Artículo 135 del citado Reglamento, para estudiar el Trabajo de Grado titulado:

**“MODELACIÓN DE PARÁMETROS FISICO-QUIMICOS UTILIZANDO
LA REFLECTANCIA SUPERFICIAL DESDE IMÁGENES DE
SATÉLITES LANDSAT. CASO ESTUDIO: EMBALSE PAO
CACHINCHE”**

Presentado para optar al grado de **MAGÍSTER EN INGENIERÍA
AMBIENTAL** por el (la) aspirante:

ABNEL ESTABA
V.- 3.700.843

Habiendo examinado el Trabajo presentado, decidimos que el mismo está **APROBADO**.

En Valencia, a los cinco (05) día del mes de Junio del año dos mil diecinueve.


Prof. Adriana Márquez

C.I.: 12604007

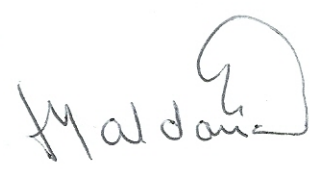
Fecha: 05/06/2019


Prof. Samuel Cárdenas

C.I.: 11.753.640

Fecha: 05/06/2019

FE: 04/06/2019 /D6.-


Prof. Julio Maldonado
C.I.: 5.670.777.
Fecha: 05/06/2019



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
ÁREA DE ESTUDIOS DE POSTGRADO
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE MAESTRÍA EN
INGENIERÍA AMBIENTAL



**MODELACIÓN DE PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS DEL
EMBALSE PAO CACHINCHE UTILIZANDO LA REFLECTANCIA
SUPERFICIAL DESDE IMÁGENES DEL SATÉLITE LANDSAT**

RESUMEN

En este trabajo de investigación abordando un tema de relativa novedad en los temas ambientales y referido a aplicaciones conformes de asociar variables ambientales, utilizando la Reflectancia Superficial, obtenida a partir de imágenes del Satélite Landsat 7, como variable dependiente, y contrapuestas a variables independientes, representadas por mediciones hechas en campo a varios parámetros de calidad de agua y observar el comportamiento con un análisis de ajuste en un modelo lineal múltiple que se utilizó. Para ello fue necesario plantear el problema como una necesidad de obtener índices de calidad del agua por métodos no convencionales de bajo costo, lo cual justifica el propósito. Se plantearon cuatro objetivos para cumplir con el objetivo principal específico, se delimitó el área de estudios, circunscrito únicamente al embalse Pao Cachinche. La aproximación a la obtención de la modelación se logró con la escogencia de un periodo de estudio, seleccionando las imágenes de satélite, aplicando las correcciones pertinentes, para seguidamente calcular la Reflectancia Superficial. Para proceder a construir para cada parámetro ya como variables independientes dentro del con bandas específicas tomadas por referencias de trabajos anteriores, expresos en los antecedentes. Determinando a través del ajuste del modelo lineal mixto. Para ello y determinaciones previas de elementos de estadística descriptiva se utilizó el software Star Grafic, el cual permite evaluar el modelo bajo su ambiente y permite, arrojando de forma tabulada los ajustes tabulados para cada parámetro. Adicionalmente se proporcionó información de cómo el uso de estas tecnologías contribuye al desarrollo sostenible. Se concluyó validando el modelo propuesto, para detallar algunas consideraciones pertinentes.

Palabras clave: Reflectancia, Parámetros de Calidad, Modelos Lineales Mixtos, Ajuste, Desarrollo Sostenible.



**UNIVERSIDAD DE CARABOBO
ÁREA DE ESTUDIOS DE POSTGRADO
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE MAESTRÍA EN INGENIERÍA
AMBIENTAL**



**MODELACIÓN DE PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS DEL
EMBALSE PAO CACHINCHE UTILIZANDO LA REFLECTANCIA
SUPERFICIAL DESDE IMÁGENES DEL SATÉLITE LANDSAT**

INTRODUCCIÓN

El uso de nuevas herramientas tecnológicas es una tendencia relativamente nueva para adoptar y adaptar las tecnologías convencionales a una amplia gama de sectores y áreas de aplicación. Su desarrollo está fuertemente influenciado por la investigación científica y sin duda, algunas relacionadas, hasta cierto punto, por las necesidades que forman parte de las Tecnologías Ambientales. Y su utilización emergente, surge como una necesidad de cubrir determinaciones de alto costo, recursos humanos, equipos, insumos y almacenamiento físico. Su uso reduce automáticamente el número de personas que toman decisiones, equipos y su almacenamiento es virtual, dejando el camino abierto hacia la comunicación digitalizada, elemento de imponderable valor en la reducción de costos. Todo esto, adicionalmente lo hace compatible con la utilización de softwares, desarrollados hoy en día, para casi todas las ciencias y, en especial para las matemáticas, estadística y otras, se logran desarrollos de modelos matemáticos que asocian variables de diferente naturaleza. Entre ellas las derivadas de la Teledetección de satelital y la ciencia ambiental las toma para su uso. En este trabajo de investigación se aplican para determinar la calidad de parámetros de calidad de agua del embalse Pao Cachinche, utilizando a La Reflectancia Superficial, como variable dependiente de mediciones de parámetros de su calidad medidos en campo; a los cuales se les procesa para establecer sus estadísticas descriptivas, utilizando el software Star Grafic; y, utilizando modelos lineales mixtos para analizarlos con estadísticos discretos como el ajuste y otros. La reflectancia fue adquirida desde imágenes del satélite Landsat, procesadas utilizando programas como Envi 4.1, y ArcGIS 10.1, donde se producen los valores de ella para cada serie contenida en un periodo de estudio seleccionado cuidadosamente. Procedimentalmente se procedió a establecer para cada periodo y cada uno de los parámetros el estudio de correlación utilizando bandas específicas y analizar su ajuste, porcentualmente. Obteniéndose porcentajes aceptables que van desde el 59.6% al 78%%. De modo que se pudo validar el modelo estadístico de regresión utilizado. Lo que induce a establecer que este tipo de enfoques nuevos en el área de ambiente además de cubrir las expectativas, ofrece una aproximación a estar desplegando nuevos métodos dentro del contexto de desarrollo sostenible.



DEDICATORIA

Este trabajo lo dedico a mis padres y a mis hermanos; símbolos de mi evolución y de tributos a deudas morales no saldadas en nuestros balances colaterales, a mi esposa e hijos y, por supuesto, a todos los profesores, compañeros de estudio; en especial a la Dra. Adriana Márquez Romance, sin su intervención no hubiese sido posible su presentación; al personal administrativo y amigos de estudios del área de postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo, a quienes toda la vida estaré agradecido.

Sinceramente
Abnel J Estaba Z

Valencia; abril de 2019

ÍNDICE GENERAL

	Página
CAPITULO I.....	- 1 -
El problema	- 1 -
I.1-Planteamiento del problema	- 1 -
I.2-Formulación del problema.....	- 5 -
I.2.1-OBJETIVO GENERAL	- 5 -
I.2.2- OBJETIVOS ESPECÍFICOS.	- 5 -
I.3-JUSTIFICACIÓN.....	- 6 -
I.4- DELIMITACIÓN	- 8 -
Capítulo II	- 9 -
II- MARCO TEORICO.....	- 9 -
II.1-Introduccion	- 9 -
Desarrollo sostenible y su relación con esta investigación	- 9 -
II.2- ANTECEDENTES.....	- 14 -
II.3 BASES TEÓRICAS	- 20 -
II.3.1 Sensores Remotos.....	- 20 -
II.3.2. Radiación Electromagnética.....	- 20 -
II.3.3-Espectro Electromagnético	- 22 -
II.3.4 Curvas espectrales	- 25 -
II.4-Imágenes de Satélites	- 30 -
II.4.1 Procesamiento Digital de Imágenes	- 31 -
II.4.2 Georreferenciación	- 31 -
II.4.3 Corrección Atmosférica	- 32 -
II.5-Corrección Radiométrica	- 34 -
II.6-Sensor ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus)	- 34 -
II.7-Modelo de regresión y correlación estadísticos	- 35 -
II.7.1-Definiciones y conceptos de la regresión.....	- 36 -
II.7.2-Representación de los datos	- 36 -
II.7.3-identificación del aspecto del diagrama de dispersión.....	- 37 -
II.7.4-Modelo de regresión simple	- 39 -
II.7.5-Modelo Regresión múltiple.....	- 40 -
II.7.6-Test estadístico Durbin Watson	- 40 -
II.8-Bandas y modelos lineales utilizados en este estudio	- 41 -
II.8-Parametros de la calidad del agua	- 42 -
II.8.1-Coliformes totales	- 45 -
II.8.2-CONDUCTIVIDAD ELECTRICA	- 46 -
II.8.3-NITROGENO TOTAL	- 49 -
II.8.4-DEMANDA BIOLÓGICA DE OXÍGENO (DBO)	- 50 -

II.8.5-DEMANDA QUIMICA DE OXIGENO (DQO).....	- 52 -
II.8.6-FOSFORO TOTAL.....	- 53 -
II.8.7-pH.....	- 54 -
II.8.8-PLANCTON	- 55 -
II.9-horizontes y metas de las ciencias espaciales en el medio ambiente	- 57 -
CAPÍTULO III.....	- 58 -
MARCO METODOLÓGICO.....	- 58 -
III.1-TIPO DE INVESTIGACIÓN	- 58 -
III.1-DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN	- 58 -
III.1-Etapas de la investigación.....	- 60 -
III.1.1-Primera Etapa.....	- 60 -
III.1.2.-Segunda etapa:	- 60 -
III.1.3-Tercera etapa.....	- 61 -
III.1.4-Cuarta etapa	- 62 -
Capitulo IV.....	- 64 -
Presentación de resultados	- 64 -
IV.1 Descripcion del area de estudio	- 64 -
IV.2-Selección de las imágenes de satélites Landsat	- 68 -
IV.3-Characterizar los parámetros fisicoquímicos del embalse Pao-Cachinche.	- 72 -
IV.3.1-Fósforo total (figura 9a):	- 72 -
IV.3.2-Nitrógeno total (figura 9b):	- 74 -
IV.3.3-Plancton (figura 9C)	- 76 -
IV.3.4-Demanda de oxígeno biodegradable (Figura 9d)	- 76 -
IV.3.5-Demanda química de oxígeno (Figura 9e):	- 77 -
IV.3.6-Coliformes totales (Figura 9F)	- 77 -
IV.3.7 Conductividad eléctrica (figura 9g):	- 77 -
IV.4-Calibracion de los modelos lineales mixtos multivariantes de los parámetros fisico-químicos del embalse Pao-Cachinche.....	- 79 -
IV.4-1- Fósforo total (TABLA 4)	- 79 -
IV.4-2-Nitrógeno total (Tabla 4).....	- 79 -
IV.4-3-Plancton (TABLA 4).....	- 80 -
5) DQO (Tabla 4).....	- 81 -
IV.4-5-Coliformes totales (Tabla 4).....	- 81 -
IV.4-6-Conductividad eléctrica (Tabla 4).....	- 82 -
IV.5-Evaluacion del ajuste estadístico de los parámetros fisicoquímicos a la reflectancia superficial del embalse Pao-Cachinche obtenida a partir de imágenes de satélites Landsat.	- 84 -
IV.5.1-Fósforo total (Tabla 5).....	- 84 -
IV.5.2-Nitrógeno total (Tabla 5)	- 84 -
IV.5.3-Plancton (Tabla 5)	- 85 -
IV.5.4-DBO (Tabla 5).....	- 85 -
IV.5.5-DQO (Tabla 5).....	- 85 -

IV.5.6-Coliformes totales (Tabla 5).....	- 85 -
IV.5.7-Conductividad eléctrica (Tabla 5)	- 86 -
IV.6-DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	- 86 -
CAPITULO V	89
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	89
V.1- CONCLUSIONES	89
V.2 RECOMENDACIONES	90
BIBLIOGRAFÍA	91

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 Características de la radiación electromagnética.	- 21
-	
FIGURA 2 Esquema del espectro radiométrico..	- 22
-	
FIGURA 3 Interacción de los objetos con la Radiación Electromagnética	- 24 -
FIGURA 4 Comportamiento espectral del suelo.	- 28 -
FIGURA 7 Representación de un modelo lineal simple	- 39 -
FIGURA 8 Ubicaciones geo-referenciadas planta Pao Cachinche y puntos de toma de parámetros	- 65 -
FIGURA 9.-Ubicación político-geográfica del embalse Pao Cachinche.....	- 65 -
FIGURA 10 Imágenes del satélite Landsat usadas para extraer la variable de reflectancia superficial desde el embalse Pao Cachinche, Venezuela	- 71 -

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1 Resoluciones específicas de cada banda.....	- 35 -
TABLA 2 Resumen de los parámetros y bandas frecuentemente usados estadísticamente	- 42 -
TABLA 3 Características de las imágenes de satélite Landsat ETM- 67.-	-
TABLA 4.-Coeficientes de modelos de parámetros físico-químicos y biológicos medidos en el reservorio de agua Páo Cachinche	- 83 -
TABLA 5.-Parámetros estadísticos de ajuste de modelos de parámetros físicoquímicos y biológicos medidos en el reservorio de agua Pao Cachinche..	86

CAPÍTULO I

EL PROBLEMA

I.1-PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En términos globales, la calidad del agua, según el consenso de diferentes autores (ARBOLEDA, 2000), se debe considerar como una referencia a las cuantías de sustancias químicas, físicas, biológicas o radiológicas que existen combinadas en su estructura. En estos términos, se puede considerar como una medida de la condición del agua en relación con los requisitos de una o más especies bióticas o, a cualquier necesidad humana o propósito. Se utiliza con mayor frecuencia, en referencia a la comparación de un conjunto de normas particulares y elementos deontológicos locales, contra las cuales puede evaluarse su cumplimiento. Los estándares más comunes utilizados para evaluar la calidad del agua, se relacionan con la salud de los ecosistemas, seguridad de contacto humano y agua potable. Y obviamente, al tipo de contacto generado en sus distintas fases de su estado presentes en su ciclo hidrológico, dada su condición de solvente universal.

Para el agua, la cualidad de sustancia molecularmente pura, como H_2O , es una condición absoluta, muy raramente observada. Los volúmenes de agua almacenada en embalses para diferentes propósitos debe ser evaluada bajo monitoreo constante; dada su peculiaridad de haber tenido contacto directo con los diferentes elementos; orgánicos e inorgánicos presentes en medios bióticos y abióticos presentes en las

esorrentías de los sistemas lóticos o lénticos; con la toma de muestras en sitio o, bien en el seno del cuerpo de agua donde estas variables deban ponderarse y; en lo que se refiere, a la almacenada para consumo humano en grandes proporciones, se debe efectuar bajo normas y estándares de métodos normalizados y aceptados por los entes que pretenden regularlas o establecerlas (ARBOLEDA, 2000).

Consecuentemente, a nivel mundial los progresos tecnológicos han proporcionado elementos que permiten avances a cualquier proceso evolutivo de instauración de herramientas que modelan e intervienen los entornos; dentro de ellos, el académico o ciencia perteneciente a él; verbigracia, la ciencia ambiental. Y, es tan solo, por proporcionar un conjunto de diferentes técnicas combinadas de disciplinas convencionales con avances de otros nuevos elementos, tales como las imágenes satelitales aplicables en actividades de una determinada disciplina. La teledetección utilizando sensores remotos, tanto a nivel académico como en la utilización de herramienta práctica de aplicación y como técnica propiamente dicha, dispone de nuevos métodos, todos adaptables a estructuras de datos generados por la medición de cualquier variable, utilizando imágenes satelitales de diferentes bandas y longitudes de ondas discretas, procesables informáticamente y estadísticamente, interpolables dentro de sus valores propios de variables captadas en imágenes satelitales u obtenidas bajo cualquier plataforma móvil que pueda desplazarse sobre una determinada superficie.

En Venezuela, al igual que en todos los países, el monitoreo de la calidad del agua con fines diversos, siendo la de mayor proporción la realizada con propósitos de

potabilización, proporcionando a través de métodos convencionales estandarizados y acarreando ingentes costos, definidos por tres grandes rubros; a saber: Gastos de transporte del personal, insumos de reactivos químicos y depreciación de equipos utilizados. Por otra parte, la información generada solo tiene connotaciones operativas, desde el punto de vista de dosificación de sustancias químicas en los procesos físico químicos de potabilización. Sus posteriores análisis para fines de monitoreo de la calidad de agua almacenada en embalses y reservorios de las diferentes cuencas, generalmente son realizados *ex post facto*, es decir, la relevancia de algún parámetro fuera de máximos permisibles contemplados en normas locales o de ámbito mundial, es solo percibida, tan solo cuando las medidas, supuestamente correctivas, solo son de tipo mitigante de los efectos, con el desarrollo, en la mayoría de los casos, de obras de infraestructuras relacionadas con disminuir el efecto de componentes disueltos en el agua, de altísimos costos.

Por tanto, esto representa un problema a resolver. Constituido en obtener estimaciones de parámetros de calidad del agua bajo métodos actualizados de menor costo, de mayor o mejores condiciones de gestión para ser evaluados en términos perentorios más cercanos a la realidad, más concurrentes en ofrecer en tiempos reales la dinámica de escorrentías aportantes a los embalses y, por supuesto la disminución de costos de monitoreo de la calidad del agua.

Específicamente, en la Cuenca Media y Baja del Río Pao, estados Carabobo y Cojedes, Venezuela, se encuentra emplazado el Embalse Pao-Cachinche; principal reservorio de agua del llamado Sistema Regional del Centro I, con una capacidad de $145 \times 10^6 \text{ m}^3$ asegura, con el aporte de cinco efluentes principales, el abastecimiento confiable a una parte de la región central del país; establecida demográficamente entre el eje vial Tinaquillo-La Victoria, el cual es franqueado por él.

Este embalse; según un estudio de caracterización Limnológico, realizado en 1999 por el Instituto Experimental de Biología de La Universidad Central de Venezuela; determinó que se encuentra en una condición hipertrófica (ERNESTO J GONZALES RIVAS, JUNIO 2000). Muchas serían las causas que se pudieran inferir para adquirir esta condición, no deseable, dado los propósitos de uso del mismo.

En este orden de ideas, se considera plausible la realización de un estudio cronológico que permita analizar; utilizando la reflectancia superficial del Embalse Pao Cachinche, adquirida a partir de imágenes satelitales, obtenidas desde la base de datos de la familia de satélites Landsat; para integrarlas en un estudio estadístico de modelos lineales mixtos; y ya ajustadas las variables pertinentes, determinar la validez de su aplicación, con el propósito de ofrecer un nueva herramienta dinámica e inductora de un nuevo recurso, tanto académico como técnico pragmático y de gestión de cuencas propiamente dicho, utilizable en la prevención y mitigación de efectos contaminantes de nutrientes que escurren a este tipo de reservorios para eutroficarlos y, de igual modo, permita una mejor planificación de descargas contaminantes a estos ecosistemas.

I.2-FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

La formulación del problema conduce a responder las siguientes preguntas de investigación:

¿Cuáles son los modelos matemáticos y sus componentes para la estimación de parámetros fisicoquímicos del embalse Pao-Cachinche a partir de la reflectancia superficial, obtenidas, por ejemplo, desde imágenes de los satélites Landsat?

¿Cuáles imágenes del grupo de satélites Landsat pueden ser seleccionadas?

¿Qué características tienen los parámetros fisicoquímicos del embalse Pao Cachinche?

¿Cuál es el ajuste estadístico de los modelos lineales mixtos multivariables para estimar los parámetros físico-químicos a partir de la reflectancia superficial del embalse Pao-Cachinche?

¿Cuál es el valor agregado que aportaría este tipo de aplicación tecnológica al desarrollo sostenible?

I.2.1-OBJETIVO GENERAL

Proponer modelos matemáticos para la estimación de parámetros fisicoquímicos a partir de la Reflectancia Superficial del embalse Pao-Cachinche desde imágenes de satélites Landsat.

I.2.2- OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

I.2.2.1-Seleccionar las imágenes de satélites Landsat

I2.2.2-Characterizar los parámetros fisicoquímicos del embalse Pao-Cachinche.

I.2.2.3-Calibrar los modelos lineales mixtos multivariantes de los parámetros físico-químicos del embalse Pao-Cachinche.

I.2.2.4-Evaluar el ajuste estadístico de los parámetros fisicoquímicos a la reflectancia superficial del embalse Pao-Cachinche obtenida a partir de imágenes de satélites Landsat.

I.3-JUSTIFICACIÓN

La necesidad de experimentar e identificar la calidad y estado ambiental del embalse Pao Cachinche; establecido como el primer embalse construido en los límites de los estados Carabobo y Cojedes, constituye una función de diferentes propósitos; tales como, la calidad de suministro de agua cruda del efluente de la Planta de Potabilización Dr., Alejo Zuloaga y su posterior envío para cubrir las demandas de abastecimiento de una amplia zona de la región central; es de importancia para la toma de decisiones oportuna, tanto en la operación de los diferentes tratamientos fisicoquímicos, como también en el desarrollo de elementos de planificación ambiental en el manejo de cuencas, en este caso la Cuenca Media y Baja de Río Pao.

Los ecosistemas humanos emplazados en esta cuenca, al ser ambientes antrópicos insertados en cotas superiores a las de ubicación geográfica del embalse, generan una serie de modificaciones al agua de almacenamiento y posterior tratamiento para el consumo humano, originan diferenciaciones ecológicas e hidrológicas a la dinámica hídrica del ecosistema del embalse propiamente dicho.

La generación de información oportuna y en tiempo real que permite conocer el comportamiento limnológico y biológico de los embalses, demanda la realización de inventarios constantes de los parámetros que la definen, como la calidad del agua y comportamiento limnológico. Estos inventarios por lo general son costosos y demandan una gran logística para su desarrollo en aquellas zonas donde es posible su acceso. En otras zonas, donde las condiciones geográficas, climáticas o de orden público lo impiden sencillamente estos inventarios no se realizan o, bien, con dilatada periodicidad. Y aún más, son archivados como datos estáticos de difícil manejo por parte de los administradores de la gestión hídrica local. Por tanto, un estudio satelital utilizando imágenes satelitales, obtenidas con el uso de sensores remotos, instalados sobre plataformas orbitales como los satélites Landsat; las proporcionarán más oportunamente. Y de este modo, tanto la operación de los procesos fisicoquímicos como la planificación oportuna del manejo integral de cuencas se verán fortalecidos. Lo anterior se traduce en la reducción de la inversión económica y de tiempo, y además permiten el monitoreo permanente de los parámetros físico-químicos ya que estos sensores adquieren la información de manera periódica.

Adicionalmente por otro lado y, en este mismo orden de ideas, la incorporación de nuevos métodos que reúnen tecnologías novedosas y de actualidad, proporcionan un valor agregado tangible y demostrable al sector académico, siendo este de imponderable tenor para su condición perfectible.

I.4- DELIMITACIÓN

El ámbito o área de estudio estará circunscrita al Embalse Pao-Cachinche y su área de protección ambiental. Se tomarán en cuenta áreas de demarcación que vayan más allá del área de inundación, solamente para definir cualitativamente algunos elementos acentuantes contaminantes, tales como la expansión demográfica en los procesos de degradación de la calidad del agua del embalse

Por otra parte, las imágenes de satélite ofrecen una alternativa para identificar una relación entre los datos reunidos en estas y los parámetros medidos en campo, generando información confiable sobre la limnología de este embalse. El embalse del Pao en el paso llamado Cachinche fue seleccionado para el presente caso de investigación por su importancia hídrica, en cuanto a abastecimiento de agua potable para los estados Carabobo, Cojedes y Aragua, y. adicionalmente, posee relativa facilidad de acceso, lo que facilita la toma de muestras en campo. Este embalse cuenta con veintitrés años de muestreo en campo, comprobados y una amplia concurrencia, en número y tipo de imágenes que cubren el área.

Este estudio pretende mostrar las características capacidad de las imágenes Landsat en la predicción de la calidad del agua del embalse Pao-Cachinche mediante el análisis de sus alcances y limitaciones. Este caso de investigación permite establecer la viabilidad de replicar esta técnica en otros cuerpos de agua adyacentes, dentro de la misma cuenca, con características similares.

Adicionalmente; el caso estudio, además de permitir establecer tiempos más acertados en la dinámica de variaciones de la calidad del embalse Pao-Cachinche; proporcionar elementos nuevos de comparación de métodos al sector académico de un tema saturado de métodos convencionales

CAPÍTULO II

II- MARCO TEÓRICO

El presente capítulo está propuesto a mostrar las bases teóricas y legales que sustentan esta investigación, no sin antes determinar un punto de partida, establecido este en el marco sucinto del estudio del arte de las aplicaciones y sus avances a través del tiempo.

II.1-INTRODUCCIÓN

DESARROLLO SOSTENIBLE Y SU RELACIÓN CON ESTA INVESTIGACIÓN

En los siglos que antecedieron al siglo XX, se consideró y era habitual un desarrollo de la especie humana y su ecosistema con derecho a explotar todos los recursos naturales del medio ambiente, con marcados aspectos de considerarlo inagotables, sin tomar en cuenta a las otras especies y a cualquier medio (biótico, abiótico). Esta actuación, hoy catalogada como antropocéntrica, dada la observancia directa de no ser ya inagotables y, se consideró el profuso daño causado al medio ambiente y sobre todo a la diversidad biológica del planeta. Es entonces cuando surgen corrientes de otro pensamiento, que toma en cuenta la vida de los otros ecosistemas. Su proceder fue y es considerado como biocéntrica al tomar en cuenta la vida de todas las especies presentes en el medio ambiente como premisa, se considera este periodo como de gran avance y,

sobre todo, porque se considera, el propulsor de los primeros indicios de crear una ciencia ambiental.

Posteriormente; el avance de las ciencias desencadenó desarrollos económicos, propulsados por La Revolución Industrial; en su Primera y Segunda Etapa. Generó un proceso de grandes transformaciones económicas y sociales que comenzaron en Inglaterra en el siglo XVIII. esta revolución se extendió por gran parte del hemisferio norte de Europa, EE: UU, y todas sus áreas de influencia, durante todo el siglo XIX y principios del siglo XX. El bienestar económico en desarrollo trajo consigo un aumento de la población mundial, generando demandas de insumos y servicios, solicitante de mayor cantidad de materias primas para su crecimiento industrial. Y todo esto en detrimento del medio ambiente en general. Y por la creciente necesidad de detenerlo, ya que la mayoría de los expectantes de orden científico y académico. coinciden en establecer que pareciera que de nuevo se deterioraba el Medio Ambiente, pero a un gradiente mayor, representando ya no una amenaza para los medios bióticos y abióticos, sino más bien para la permanencia del ecosistema humano. Entonces, surgen nuevos criterios para abordarlo. Dentro de estos nuevos criterios surgió uno en particular, que considera la actuación del ser humano y el medio ambiente bajo un nuevo concepto, con expresiones, tales como: Desarrollo Sostenible, Desarrollo Perdurable, y Desarrollo Sustentable que se aplican o se entienden como una forma de desarrollo socioeconómico más humano.

Sus primeras definiciones se formalizaron por primera vez en un documento conocido como el Informe Brundtland de 1987, denominado así por la primera ministra

noruega Gro Harlem Brundtland, integrante de la Comisión Mundial de Medio Ambiente y Desarrollo de Naciones Unidas (ONU), creada durante la Asamblea de las Naciones Unidas en 1983. Dicha definición se asumió en el Principio 3º de la Declaración de La Conferencia Río de Janeiro para el Medio Ambiente (1992) y aprobada en la Conferencia de la (ONU) sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo. Es a partir de este informe cuando se acató el término inglés Sustainable Development, y, de ahí, nació la confusión entre los términos desarrollo sostenible y desarrollo sustentable. La diferencia es sustantiva ya que desarrollo sostenible implica un proceso en el tiempo y espacio y va de la mano de la eficiencia, lo cual le permite paralelamente ser eficaz. Mientras que el desarrollo sustentable implica una finalidad (aquí/ahora) y va de la mano de la eficacia mas no necesariamente de la eficiencia. Por tanto, un verdadero desarrollo sostenible implica por añadidura sustentabilidad, pero la sustentabilidad no implica necesariamente sostenibilidad.

En resumen, el desarrollo sostenible o sustentable es un concepto desarrollado hacia el fin del siglo XX como alternativa al concepto de desarrollo habitual, haciendo énfasis en la reconciliación entre el bienestar económico, los recursos naturales y la sociedad, evitando comprometer la posibilidad de vida en el planeta, ni la calidad de vida de la especie humana. El Informe sobre la Situación del Voluntariado en el Mundo resalta que, en la mayoría de sociedades del mundo, los voluntarios contribuyen de forma significativa al desarrollo económico y social, permitiendo de este modo, una mayor participación.

Para desarrollarlo, se organizó la ciencia ambiental, como soporte necesario para desplegarlo. Son notorios los avances en; Deontología Ambiental, Administración Ambiental y un sin número de ciencias auxiliares que bajo modelación matemática, fisicoquímica y estudios de grupos sociales y sus costumbres; para definir las actuaciones dentro del medio ambiente. Y en caso de el último mencionado, entendida como Variable Social Ambiental , cobra relevancia oportuna, para explicar que el interés que el ser humano muestra en el aprovechamiento de los recursos naturales, por necesidad, es posible en la medida que ninguna de sus actividades genere Externalidades tanto, Económicas como Medioambientales, ya que de otro modo se generan Pasivos Ambientales, cuya mitigación requiere además de tiempo, el gasto ingente de muchos costos asociados y, que en general, de alguna manera son trasladados a las generaciones futuras.

En este orden de ideas, la presente investigación aborda un tema de relativa y reciente creación. Más bien que un tema, representa el avance de ciencias auxiliares que toman las ciencias ambientales, para georreferenciar, monitorear y controlar los efectos del hombre sobre el medio ambiente, de una manera más oportuna y eficiente. Específicamente, ellas hoy en día utilizan la tecnología digital, en combinación con la de satélites en órbita, y en mezclanza con modelos matemáticos estadísticos para obtener respuesta a cada fenómeno de lo que ocurre con el medio ambiente.

A continuación, se desarrolla un compendio de bases teóricas que servirán de soporte conceptual, en el estudio del Medio Hídrico en particular, representado por el embalse Páo Cachinche, emplazado sobre la Cuenca Media del Rio Páo, quien, a

través del tiempo, con distintos usos (agrícola, agropecuario, aprovechamiento hidroeléctrico, pesca y recreación); hoy en día presenta una condición de deterioro en la calidad de las aguas que aloja.

II.2- ANTECEDENTES

La implementación de métodos para la utilización de las imágenes de satélite para el pronóstico de parámetros físico-químicos en los cuerpos de agua tiene su origen en el año 1983, con la investigación de Lillesand (1983). Este autor desarrolló modelos de predicción para los parámetros: Profundidad del Disco Secchi, Clorofila-a, Fósforo Total, Turbidez, Color y Nitrógeno Total, así como el índice de Estado Trófico (Carlson, ETI), para 60 lagos distribuidos en dos escenas Landsat y basados en datos obtenidos de mediciones de campo. Se determinó el nivel de correlación para cada parámetro, siendo los parámetros con mayor valor de correlación, la profundidad y la clorofila a, mientras que el parámetro con menor valor de correlación fue el fósforo. Como aporte de esta investigación se destaca el tratamiento aplicado a las imágenes para extraer la información y los modelos matemáticos obtenidos (Lillesand, 1983).

En 1987, Tassan resume en su estudio los problemas más comunes y algunos aspectos de la interpretación de los datos en el uso del sensor Thematic Mapper, para la supervisión de la calidad del agua en el mar Adriático. Los parámetros trabajados en este estudio fueron la Concentración de Clorofila y Sedimentos Totales. El autor identificó la necesidad de corregir las imágenes y verificar los niveles de

Reflectancia; ya que se veían afectados por la atmósfera. El modelo matemático utilizado fue el logarítmico (Tassan, 1987).

En 1992, Schiebe realizó un estudio donde utilizó datos de calidad del agua del Lago Chicot (Arkansas) y un conjunto correspondiente a datos de imágenes del sensor SMS de Landsat, para establecer la capacidad del satélite para monitorear la concentración de sedimentos suspendidos, profundidad del Disco de Secchi, y Turbidez. Esta investigación utilizó tres diferentes modelos matemáticos para identificar la relación entre los parámetros medidos en campo y datos del satélite: Lineal Simple, Exponencial y Logarítmico. Los resultados arrojaron que el modelo exponencial presentó un mejor nivel de correlación (0.716) y la banda, presentó los mejores resultados para la predicción de la concentración de sedimentos en suspensión (Schiebe, 1992).

En 1993, Baban desarrolló una investigación en la zona de Norfolk (Reino Unido), con el objetivo de determinar la calidad de agua usando imágenes Landsat. Los parámetros estudiados fueron: Clorofila a, Fósforo, Transparencia obtenida con el Disco Secchi, Sólidos Disueltos y Temperatura. El modelo matemático empleado fue el de Regresión Lineal Múltiple. El parámetro clorofila a obtuvo los valores más altos de correlación, permitiendo predicciones más precisas de su comportamiento en cualquier periodo estacional del año.

En 1995, Serrano analizó la evolución del estado trófico de tres embalses en la región del Alicante (España), mediante el uso de imágenes de satélite. Los parámetros estudiados fueron Clorofila a, Transparencia medida con Disco Secchi, Temperatura

y Sólidos Disueltos. En este trabajo se aplicó una técnica de normalización de los datos obtenidos de las imágenes para lograr una comparación confiable entre el estado trófico, identificado en las dos fechas de estudio. Los modelos utilizados fueron de tipo logarítmico (Serrano, 1995).

Giardino (2001) en el lago Eliseo (Italia) realizó la medición de la concentración de Clorofila, la Temperatura y el Nivel de Transparencia por medio de imágenes Landsat, encontrando las mejores correlaciones con las bandas 1, 3 y 6. Esta investigación incluyó el uso de índices de vegetación (NVDI), obtenidos por medio del procesamiento de las imágenes, que permitieron identificar mejor el comportamiento de la clorofila dentro del lago. La diferencia promedio entre los valores obtenidos en sitio y los valores calculados con el modelo fue de 3.8 mg/m^3 para la clorofila y para la temperatura de 0.3°C .

Aiman & Mohsen (2004) efectuaron estudios en el Río Rosseta en Egipto, correlacionaron valores de los parámetros pH, Oxígeno Disuelto, Transparencia, Clorofila, DBO y DQO, con valores de Reflectancia de imágenes World View-2, se emplearon modelos lineales múltiples con valores de r^2 que oscilaron entre los 0.37 y 0.8.

En 2004, Yunpeng & Guoying correlacionaron parámetros bioquímicos como demanda biológica de oxígeno (DBO) y demanda química de oxígeno (DQO) con los correspondientes valores de Reflectancia obtenidos a partir de cuatro bandas de imágenes de satélite. En este caso los niveles de correlación fueron altos entre los valores obtenidos en sitio y las bandas 1, 2, 3. El valor de error medio cuadrático

calculado para cada modelo fue de 0.24 mgO₂/l para DBO y 0.30 mgO₂/l para DQO. Este trabajo comprobó la posibilidad de correlacionar parámetros bioquímicos y los datos obtenidos de las imágenes (Yunpeng & Guoying, 2004).

En 2004, Hellweger estudió la hidrografía del Puerto de New York, utilizando imágenes de los sensores Landsat y Modis. Con los datos obtenidos del sensor Landsat se correlacionó el parámetro turbidez, y con el sensor Modis se correlacionó el parámetro Clorofila a. El modelo matemático utilizado fue el Logarítmico con un coeficiente de correlación de 0.85 (Hellweger, 2004).

De La Hoz & Gotilla (2009) realizaron un estudio en el Lago Valencia con imágenes del sensor Modis del satélite Terra, complementado con información recopilada en estaciones de medición dentro del cuerpo de agua. Los autores buscaban predecir la evolución en el tiempo y comportamiento en el lago de la concentración de clorofila. Para este fin se empleó un análisis geoestadístico por medio de Técnicas Kriging, permitiéndose identificar las variaciones de la concentración de Clorofila a cortas distancias y en espacios de tiempo definidos.

La concentración de clorofila se definió para este estudio como un parámetro indicador de la eutroficación en el lago, ya que por medio del modelo se ubicaron las fuentes y lugares con las mayores concentraciones de clorofila en una serie de temporal.

Karakaya (2011) Monitoreo la calidad del agua superficial del lago Abant en Turquía. Los parámetros monitoreados fueron oxígeno disuelto, clorofila a, transparencia

y temperatura, con las bandas del sensor Landsat 7, se crearon modelos lineales simples los valores de r^2 oscilan entre 0.37 y 0.99.

Tebbs & MacArthur (2011) estudiaron el comportamiento de la Alcalinidad en los lagos Bogoria y Elmenteita, ubicados en el este de África y que presentan la condición ambiental de ser alcalino-salinos. Identificaron la presencia de Productores Primarios Planctónicos y Bentónicos, que fueron relacionados con el nivel de Alcalinidad en el agua y con los valores de Reflectancia de la banda cuatro de imágenes Landsat, se utilizó un Modelo Lineal Simple y un Coeficiente de Determinación entre 0.9 y 0.80.

Hernández & Hernández, (2013) evaluaron la correlación de algunos parámetros físico-químicos de calidad de agua como: Temperatura, Sólidos Disueltos, pH, Conductividad, Turbidez, Sólidos Suspendidos Totales, Nitrógeno Total, Nitrógeno Disuelto, Nitrógeno Amoniacal, Fósforo Total y Fosfatos, mediante percepción remota con imágenes de los sensores Aster y Landsat, para dos de las lagunas que integran el Área Natural Protegida, Ciénegas de Lerma en México, donde se construyeron modelos lineales que tuvieron un r^2 superior a 0.9 para las bandas dos y cinco de Landsat.

Ledesma et al. (2013) utilizaron sistemas de información geográfica y modelos poblacionales de regresión lineal múltiple, para correlacionar la concentración de clorofila a, medida en 25 estaciones de muestreo con los datos de reflectancia de las bandas 2 y 4 de la imagen del satélite. El modelo obtuvo un valor de correlación

aceptable ($r^2 = 0.7$) y con este se pudieron predecir los valores de la variable en sitios no muestreados y conocer la distribución espacial de la concentración de clorofila en el cuerpo de agua.

Aguirre, Gómez (2015) Realizó un estudio en el Lago Guadalupe, México donde utilizó un Modelo Lineal Simple que, correlacionó las bandas uno y tres, de las imágenes Spot y, los valores de Clorofila y Sólidos Disueltos, los emanados del modelo y los medidos en campo y determinaron valores de r^2 de 0.601 y 0.70, respectivamente.

En Colombia, Gómez, & Dalence (2014) caracterizaron físicamente la calidad del agua de corrientes superficiales usando el parámetro Sólidos Disueltos y una imagen de satélite Geoeye en un tramo de la cuenca del río Bogotá, se construyeron modelos por cada estación de estudio y de igual forma se calculó el valor de los coeficientes de determinación específicos para cada modelo que oscilaron entre 0.8 y 0.9.

Otro estudio importante en Latinoamérica lo la implementación de imágenes de satélite para la predicción de parámetros físicos químicos del agua que se llevó a cabo en El Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas, el cual tenía como objetivo, el análisis de la temperatura superficial del mar a partir de imágenes NOAA/AVHRR para el Caribe colombiano. Este trabajo presenta un análisis del procesamiento de las imágenes, que involucra el filtrado y promedio de los datos obtenidos por el satélite, utilizando diferentes softwares.

II.3 BASES TEÓRICAS

A continuación, se describen algunos aspectos teóricos que serán abordados dentro de la ejecución del presente estudio de investigación.

II.3.1 SENSORES REMOTOS

Los sensores remotos instalados en gran diversidad de plataformas orbitales o no, permiten capturar, de acuerdo a su condición nominal, elementos y variables que se corresponden con los principios básicos de la radiación electromagnética, el espectro electromagnético y las curvas espectrales. Estos tres elementos, principal propósito de La Teledetección, serán descritos a continuación.

II.3.2. RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA

La radiación electromagnética es una combinación de campos eléctricos y magnéticos oscilantes, que se propagan a través del espacio transportando energía de un lugar a otro. Está compuesta por Longitudes de Onda y Frecuencias: Pueden manifestarse de diversas maneras como Calor Radiante, Luz Visible, Rayos X o Rayos Gamma. La radiación electromagnética. También se puede propagar en el vacío (Calera, 2003).

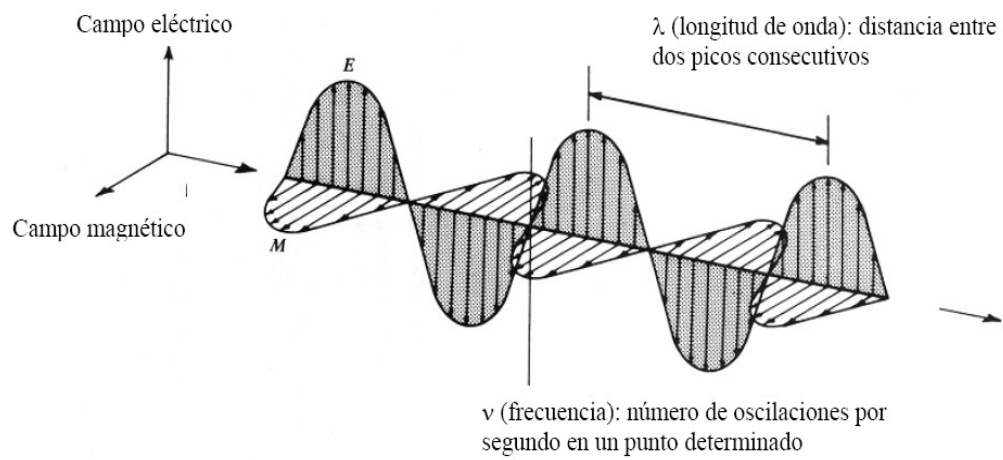


Figura 1- Características de la radiación electromagnética. Fuente: Chuvieco (2010)

II.3.3-ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO

Es el conjunto de todos los tipos de radiación electromagnética, está estructurado en bandas. Cada una, a su color correspondiente. Cada tipo de radiación tiene una frecuencia y longitud de onda que la caracteriza (Figura 2). El espectro abarca los Rayos Gamma, los Rayos X, la Luz Ultravioleta, la Luz Visible, la Luz Infrarroja y las Ondas de Radio (Chuvieco, 2010).

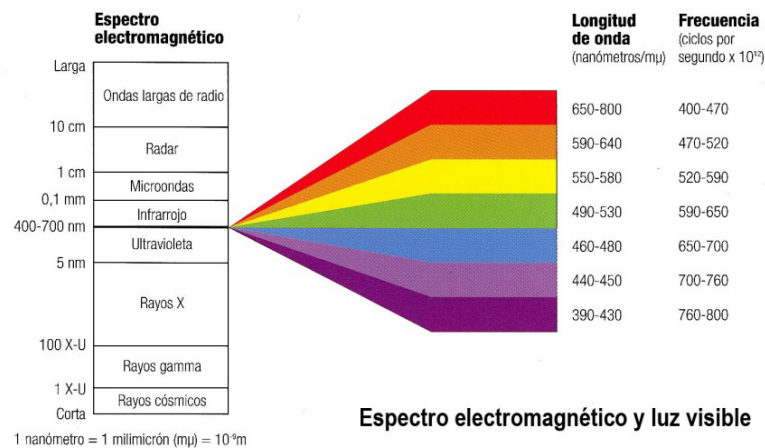


Figura 2-Esquema del espectro radiométrico. Fuente: Chuvieco (2010).

La región de la radiación térmica (0.3 a 100 μm) se origina como consecuencia de la vibración y movimiento de los átomos y moléculas, debido a la agitación térmica. Dentro de esta región se distinguen dos grandes zonas. La zona de radiación de Onda Corta es la región que va desde los 0.4 μm hasta los 3 μm. La zona de Radiación de Onda Larga es la región que va desde los 3 μm hasta aproximadamente 100 μm.

La región de la Luz Visible (0.4 a 0.7 μm) es la zona que contiene las longitudes de onda a las cuales la retina es sensible. La luz es producida por átomos y moléculas como resultado del ajuste interno del movimiento de sus componentes, principalmente en la corteza electrónica del átomo.

La región del Infrarrojo Cercano (o infrarrojo próximo) (0.7 a 1.3 μm), también se denomina zona del Infrarrojo Reflejado o Fotográfico. Parte de esta radiación puede detectarse mediante emulsiones especiales.

En la región del Infrarrojo Medio (1.3 a 8 μm) se entremezcla parte de la Radiación Solar (incidente y reflejada), y la Radiación Emitida por la superficie terrestre (especialmente en focos de alta temperatura). El Infrarrojo Lejano o Infrarrojo Térmico (8 a 14 μm) es la región en la que emite principalmente la superficie terrestre.

Las Microondas (1000 μm a 1 m) se usan en las comunicaciones por radar y otros sistemas de comunicaciones, así como también, en el análisis de detalles muy finos en la estructura atómica o molecular. Se generan con dispositivos electrónicos especiales. Son muy útiles en ciertas aplicaciones, ya que, en esta región del espectro, las nubes son transparentes, y las ondas pasan prácticamente sin distorsión. Las Ondas de Radiofrecuencia (0.1 cm a varios km) se utilizan en los sistemas de radio, televisión y comunicaciones, y son generadas por medio de dispositivos electrónicos, principalmente circuitos oscilantes (Calera, 2003).

Un flujo de radiación electromagnética al propagarse por el espacio puede interactuar con superficies u objetos, siendo reflejado, absorbido y transmitido por dichas superficies u objetos (Figura 3).



Figura 3-Interacción de los objetos con la radiación electromagnética. Fuente: Canadá Centre For Remote Sensing (2008)

La absorción produce una disminución de la radiación porque las moléculas gaseosas de la atmósfera como vapor de agua (H_2O), dióxido de carbono (CO_2), oxígeno (O_2) y ozono (O_3) atrapan los rayos de luz. Este fenómeno de la absorción es muy selectivo, limitándose a determinadas longitudes de onda dentro del espectro electromagnético (verbigracia., $<0.3 \mu m$ por el ozono). Las regiones del espectro donde estos procesos son insignificantes se denominan "ventanas atmosféricas", ya que permiten el paso de casi toda la energía sensible (Canadá Centre For Remote Sensing, 2008).

La dispersión se presenta a causa de la difusión en todas las direcciones, ya que las partículas en suspensión y las moléculas de los componentes de la atmósfera, producen sobre la radiación efectos que interactúan con ellos. De forma general, este

efecto decrece a medida que aumenta la longitud de onda. Se distinguen tres tipos de dispersión:

Dispersión "Rayleigh", este tipo de dispersión es producida por las moléculas y partículas atmosféricas que tienen un diámetro menor que la longitud de onda incidente, afectando especialmente a las longitudes de onda más cortas de espectro visible. Esta es la causa del color azul del cielo en los días despejados.

Dispersión "Mie", este tipo se produce cuando las partículas y moléculas presentes en la atmósfera tienen un diámetro de igual tamaño que la longitud de la onda de la energía incidente, afectando a longitudes de onda más largas que la dispersión Rayleigh.

Dispersión "no selectiva", este tipo de dispersión, independiente de la longitud de onda de la energía incidente, se produce cuando las partículas y moléculas atmosféricas presentan un diámetro de mayor tamaño que la longitud de onda de la radiación. Un caso típico es el color blanco de las nubes, ya que los elementos y partículas que las forman reflejan con igual intensidad todas las longitudes de onda dentro del espectro visible (azul, verde, rojo).

La dispersión atmosférica es un elemento que se debe tener siempre presente en cualquier proceso de análisis e interpretación de imágenes (Martínez & Díaz, 2005).

II.3.4 CURVAS ESPECTRALES

Los distintos tipos de coberturas terrestres (bosques, suelos, cultivos, cuerpos de agua, nieve, y otros.) se distinguen por la cantidad de energía que reflejan en una

región del espectro dado. La interacción de la radiación electromagnética con los objetos depende de sus características morfológicas, su composición físico-química y la configuración de la superficie donde estos están ubicados. Estos espectros que caracterizan el tipo de cubierta observada constituyen su firma espectral, la colección de estas firmas espectrales se conoce como curvas espectrales (Figura 4) (Chuvieco, 2010).

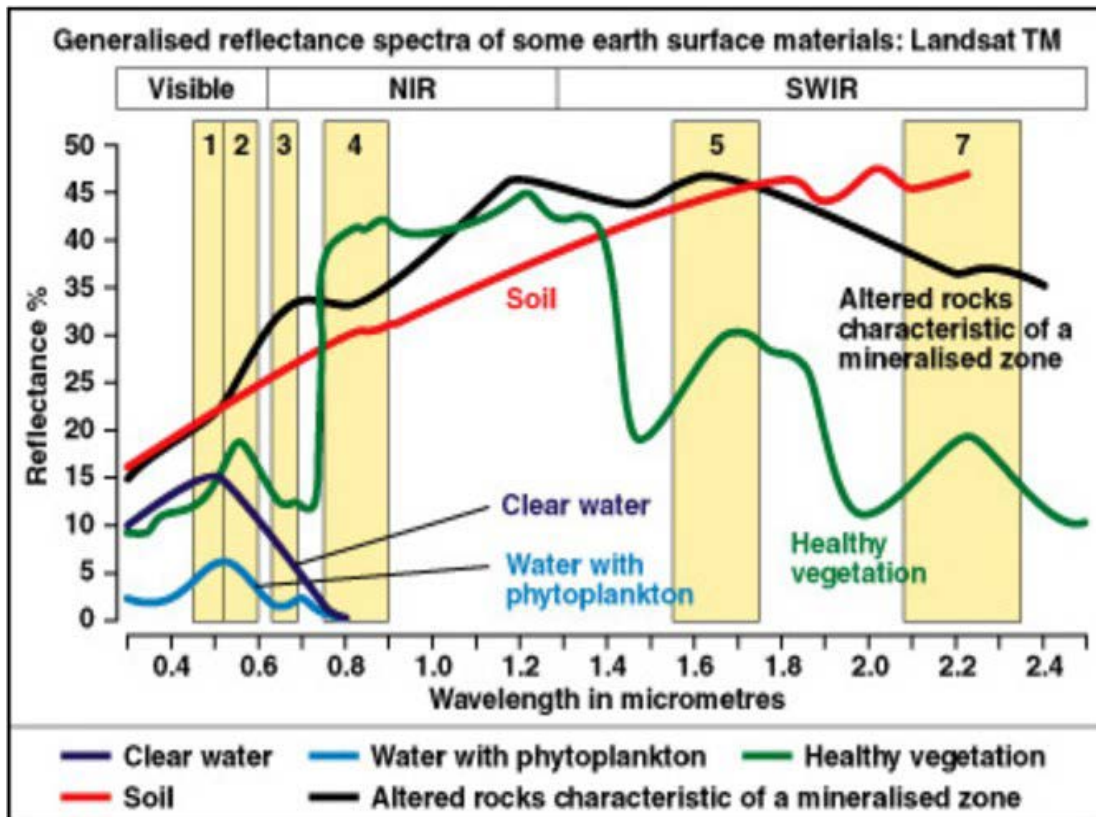


Figura 4-Curvas espectrales. Fuente: Chuvieco (2010).

II.3.5 COMPORTAMIENTO DEL SUELO, VEGETACIÓN Y AGUA EN LAS REGIONES DEL ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO

Estos tres elementos forman el paisaje, es conveniente analizar por separado su comportamiento en las diferentes regiones del espectro electromagnético y su reflectividad en particular.

II.3.5.1-SUELO

El comportamiento espectral del suelo presenta una tendencia hacia la uniformidad mostrando una curva bastante más plana y ascendente orientada hacia longitudes de onda superiores, como son las del infrarrojo cercano. La reflectividad presenta una gran variabilidad de unos suelos a otros, debido a su composición química, la materia orgánica y el contenido en agua, (humedad) son los principales factores que intervienen. La composición química define el color, los suelos de origen calcáreo tienden hacia el color blanco, indicando una alta reflectividad en todas las bandas visibles, suelos con un contenido alto en óxido de hierro presentan una reflectividad elevada en el rojo. Los altos contenidos de materia orgánica se reconocen por colores oscuros, y se traducen en reflectividades menores en todas las bandas del espectro visible. El contenido de agua en el suelo se refiere al contenido de humedad en la capa superficial y disminuye la reflectividad en todo el espectro solar (Chuvieco, 2010).

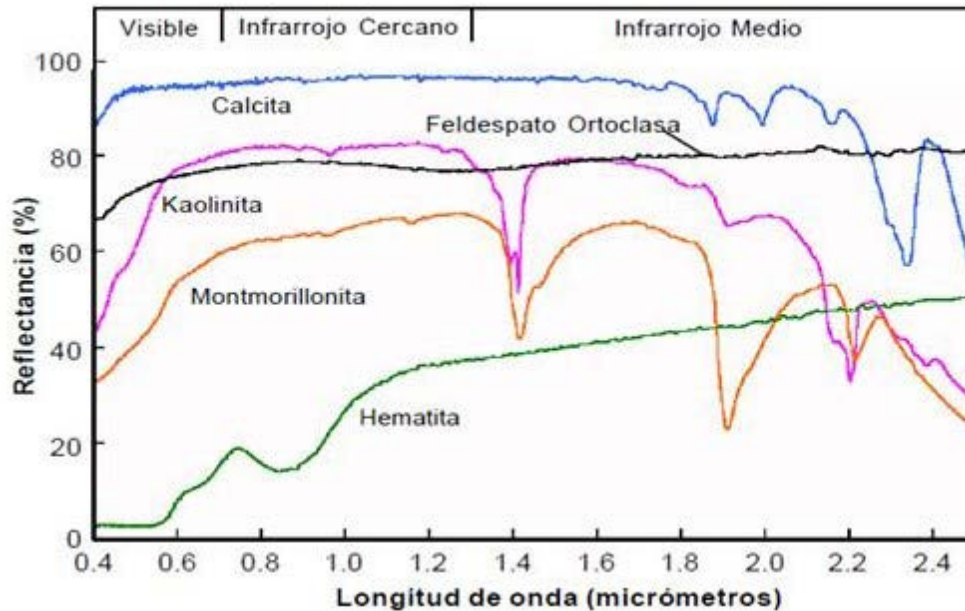


Figura 5-Comportamiento espectral del suelo. Fuente: Chuvieco (2010).

II.3.5.2-VEGETACIÓN

La curva espectral de la vegetación muestra un comportamiento típico, una baja reflectividad en el espectro visible (cercano al 10%), con un máximo relativo en la zona verde del espectro (sobre 0.55 μm). Presenta una elevada reflectividad (40-50%) en el infrarrojo cercano, reduciéndose paulatinamente hacia el infrarrojo medio.

La elevada reflectividad en el infrarrojo cercano (0.75 a 1.35 μm) se debe a la presencia en una hoja de diversos medios (agua, aire, materia orgánica, etc.) con índices de refracción distintos, que es consecuencia de la estructura interna de las hojas.

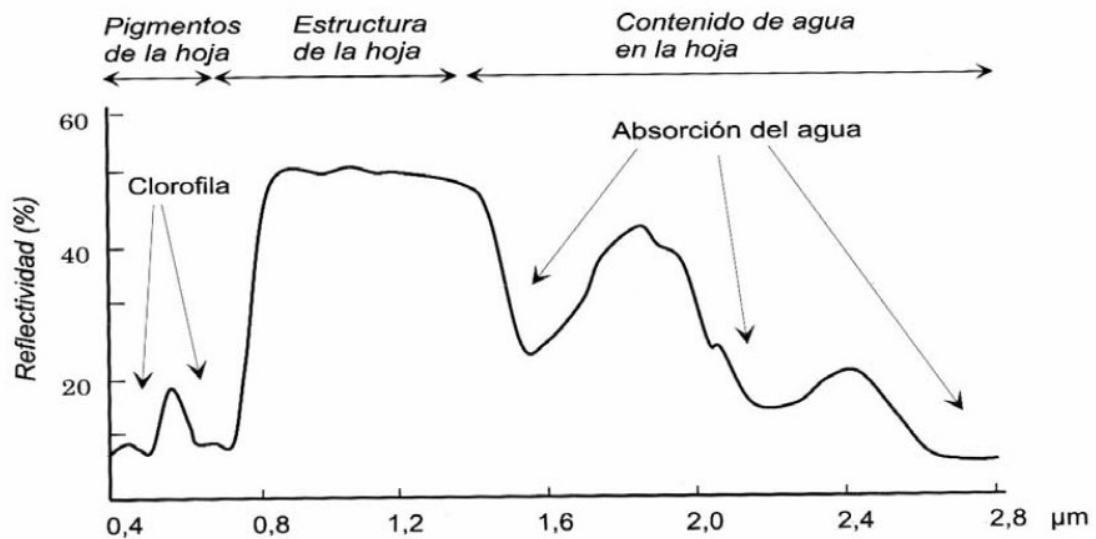


Figura 6-Comportamiento espectral de la vegetación. Fuente: Chuvieco (2010)

II.3.5.3-AGUA

El comportamiento espectral del agua se identifica por su alta reflectividad en la zona del espectro visible, se sitúa alrededor del 5%, una parte se absorbe y la mayor parte se transmite (en agua limpia y clara) y menor en la región del infrarrojo cercano y medio, evidenciando un aumento en la absorción. En el infrarrojo el agua absorbe fuertemente la radiación, muy poca se transmite. Los factores que determinan el comportamiento espectral del agua son: La profundidad, los materiales en suspensión, y la rugosidad de la superficie. En relación con los materiales en suspensión, si estos tienen clorofila se traducirá en una respuesta en el espectro visible, parecida a la de la vegetación. En relación con la rugosidad, si la superficie es lisa, se incrementan los efectos especulares, por lo que la reflectividad puede cambiar fuertemente en función de la posición relativa del sol y del sensor. Chuvieco (2010).

II.4-IMÁGENES DE SATÉLITES

Una imagen de satélite está compuesta por una matriz digital de puntos (píxeles), igual a una fotografía digital, capturada por un sensor instalado a bordo de un satélite que orbita alrededor de la Tierra. A medida que el satélite avanza en su órbita, barre la superficie con un conjunto de detectores que registran la reflexión de energía electromagnética, emisiones, temperatura, o variables de elevación topográfica o geofísica (Figura 7). Cada píxel tiene asociado un número denominado Nivel Digital (ND), quien representa la intensidad o brillo promedio de un área mínima relativa dentro de la escena, generalmente, el rango de niveles digitales va de 0 a 255 (Posada, 2009). Estas imágenes se diferencian por el número de bandas, la región del espectro electromagnético que registra cada banda, el tamaño de la escena, su resolución espacial (nivel de detalle) y su resolución temporal (tiempo que tarda en recapturar la información de una zona específica) (Martínez & Díaz, 2005).

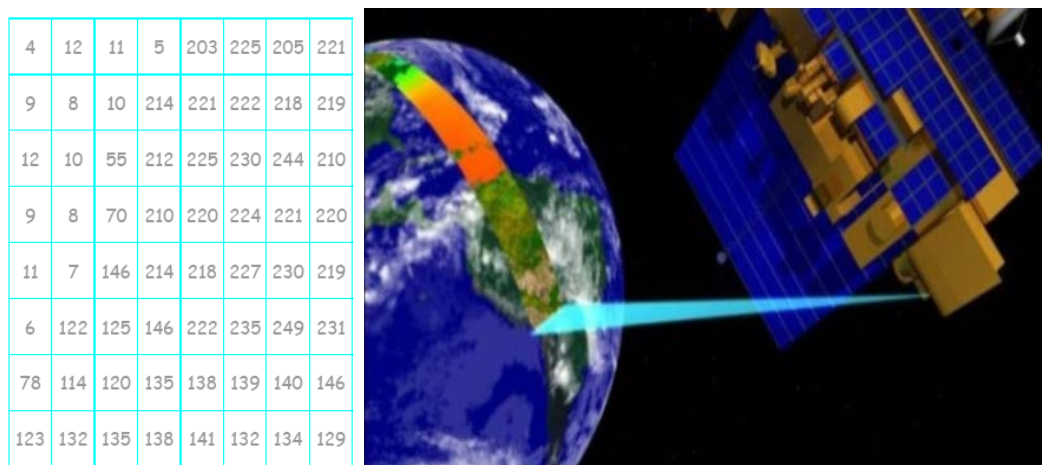


Figura 7-Forma de captura y almacenamiento de la información obtenida de los satélites. Fuente: Chuvieco (2010).

II.4.1 PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES

El procesamiento digital es el conjunto de métodos y técnicas orientados a la manipulación, análisis cualitativo y cuantitativo de las imágenes digitales, su corrección, mejoramiento, transformación y/o clasificación temática con el fin de generar información útil sobre objetos, áreas y fenómenos, sin estar en contacto con ellos. El propósito general de este procesamiento consiste en mejorar el conocimiento sobre los recursos naturales de la Tierra y del Medio Ambiente (Posada, 2009). Los procesamiento aplicados a las imágenes de esta investigación son la georreferenciación, la corrección atmosférica y la corrección radiométrica.

II.4.2 GEORREFERENCIACIÓN

Se denomina así, al proceso que permite asignar a cada píxel de una imagen unas determinadas coordenadas de acuerdo con el sistema de referencia que se desee. Una vez realizado el proceso de georreferenciación o corrección geométrica es posible considerar la imagen como un mapa, susceptible de ser superpuesto sobre cualquier otra cartografía que se encuentre en el mismo sistema de referencia (Calera, 2003).

II.4.2.1 PUNTOS DE CONTROL

Es una técnica que se realiza a partir de puntos con coordenadas conocidas en el sistema de referencia del terreno (X, Y) y en el sistema imagen (x, y). Los puntos de control se utilizan para generar una transformación polinómica que, desplaza la imagen desde su ubicación existente a la ubicación espacialmente correcta. La transformación polinómica produce dos fórmulas, para calcular las coordenadas X y

Y de salida, a partir de una ubicación de entrada (X, Y), por medio de un algoritmo de adecuación utilizando técnicas de mínimos cuadrados se deriva una fórmula general que se aplica a todos los puntos. La cantidad de puntos de control requerido para este método debe ser de 1 para un cambio de orden cero, 3 para un primer orden, 6 para un segundo orden y 10 para un tercer orden. Cuanto mayor sea el orden de la transformación, más compleja será la distorsión que se puede corregir. Sin embargo, raramente se necesitan transformaciones de más de tercer orden Chuvieco (2010)

II.4.3 CORRECCIÓN ATMOSFÉRICA

Con esta corrección se busca obtener la máxima correlación entre la señal registrada y las características de la superficie observada. De esta forma, se busca corregir la dispersión que provoca un aumento de la radiación atmosférica, regularmente ocasionada por niebla o nubes, causantes de los fenómenos de dispersión o absorción de la energía electromagnética (Chuvieco, 2010).

II.4.3.1-MÉTODO DE CORRECCIÓN BASADO EN LA IMAGEN

El método está basado en el hecho de que áreas en una imagen con valores muy bajos de reflectancia (agua, zonas de sombra) deben presentar una radiancia espectral muy próxima a cero, cualquier reflectancia aparente en estas áreas es producto de la dispersión atmosférica y esta información puede ser usada para calibrar el resto de la imagen, restando los NDs mínimos a todos los NDs de cada banda. Los píxeles más oscuros pueden ser seleccionados examinando el histograma de los ND de una imagen o estableciendo un umbral (Chávez, 1988; 1999).

II.4.3.2 MÉTODO EMPÍRICO

Esta corrección se realizaría a partir de datos de reflectancia medidos en el terreno con radiómetros o espectro-radiómetros de Y que poseen correspondencia con la georreferenciación de la imagen, Se buscar una relación lineal o cuasi-lineal entre los pares de puntos (terreno, ND), para cada banda, una vez identificada la relación se efectúa la regresión para cada canal, aplicando distintos modelos que son evaluados según su error. (Rejas, Ayuga, 2008).

II.4.3.3 MÉTODO TRANSFERENCIA RADIATIVA

El método deduce la reflectancia en el terreno a partir de la señal medida y de una caracterización de la atmósfera. Para este caso se puede disponer de un modelo desarrollado o de un modelo implementado en un software comercial. Para desarrollar este modelo se requiere conocer la radiancia registrada en el sensor, datos de iluminación para esa fecha concreta y datos atmosféricos para esa fecha.

El método se desarrolla en base a dos algoritmos: El primero estima las características ópticas de la atmósfera y se conocen como de transferencia radiativa, el segundo llamado de inversión, permite deducir las características ópticas de la superficie, por ejemplo, la reflectividad, a partir de la radiancia medida. Los efectos de dispersión molecular y de absorción pueden ser tenidos en cuenta ya que no varían en el espacio y en el tiempo. (Rejas, Ayuga, 2008).

II.5-CORRECCIÓN RADIOMÉTRICA

Las correcciones radiométricas las define un conjunto de operaciones destinadas a modificar los NDs originales de una imagen para aproximarse a los valores obtenidos en condiciones ideales (Tempfli 2009). El procedimiento consiste en convertir los NDs a parámetros físicos (radiancia) manteniendo constante la georreferenciación (posición de los píxeles).

II.6-SENSOR ETM+ (ENHANCED THEMATIC MAPPER PLUS)

Es un sensor incluido dentro de una familia de satélites denominada Landsat, el sensor Enhanced Thematic Mapper Plus, permite una sensible detección de la turbidez y contaminantes en el agua (con el uso de la banda azul), exploración minera (infrarrojo medio), contenidos de humedad en las plantas y en el suelo (infrarrojo medio) (Martínez & Díaz, 2005).

El programa LANDSAT fue desarrollado por la NASA en 1972 con el propósito del estudio de los recursos de la Tierra y, su exitosa aplicación, está comprobada a nivel mundial. Desde la época del primer satélite se han lanzado ocho programas LANDSAT. Los programas LANDSAT 4 y 5, puestos en órbita en 1982 y 1984 respectivamente, se encuentran todavía en funcionamiento, aunque su vida útil fue programada solamente para cinco años. El LANDSAT 6 fue lanzado en 1993 y contaba con significativas modificaciones en cuanto a mejoramiento de sistema de sensores, pero por problemas técnicos se perdió en el espacio después de su lanzamiento. En abril de 1999 fue lanzado Landsat 7, ubicándole en la misma

trayectoria terrestre que los satélites anteriores. Para 2014 se puso en órbita Landsat 8, que actualmente ya tiene imágenes disponibles en su servidor (Calera, 2003).

El Sistema Landsat cuenta con sensores óptico-electrónicos, denominados barredores mecánicos. Son sensores pasivos, que captan solo la energía reflejada de las superficies terrestres iluminadas por el Sol. Esta energía se registra en formato digital y se transmite directamente mediante un sistema de telemetría a las estaciones terrestres; se procesa, introduciendo correcciones geométricas y radiométricas; y se archiva en dispositivos digitales. El sistema Landsat, dependiendo de la serie, está dotado de diferentes sensores que se resumen en la Tabla 1

Tabla 1-Resoluciones específicas de cada banda.

Banda	Resolución Espectral (Nm)	Resolución Espacial (m)	Resolución Temporal (días)
1	0.45 - 0.52	30	16
2	0.52 - 0.60	30	16
3	0.63 - 0.69	30	16
4	0.76 - 0.90	30	16
5	1.55 - 1.75	30	16
6	10.4 - 12.55	120/60	16
7	2.08 - 2.35	30	16
Pancromática	0.52- 0.90	15	16

Fuente: Instituto Geográfico Agustín Codazzi (2009)

II.7-MODELO DE REGRESIÓN Y CORRELACIÓN ESTADÍSTICOS

El análisis de la regresión es una técnica estadística que se utiliza para estudiar la relación entre variables o factores cuantitativos, referidos a un mismo grupo de unidades observadas.

Se trata de comprobar estadísticamente si, tal relación es posible, de serlo, expresarlo matemáticamente mediante una ecuación.

Su uso más frecuente es el de la predicción de resultados de una variable para valores fijos de otras que se tratan de correlacionar.

II.7.1-DEFINICIONES Y CONCEPTOS DE LA REGRESIÓN

Cuando se cree que algunas de las variables pueden causar (o al menos explicar) los cambios observados en otra, a éstas se les llama variables explicativas (X 's)

La que mide el resultado del estudio se le llama variable respuesta (Y)

En este tipo de estudio se intentará establecer una ecuación de la forma $Y=g(x)$

II.7.2-REPRESENTACIÓN DE LOS DATOS

La manera de mostrar gráficamente los datos observados en un gráfico es a través de un diagrama de dispersión.

Y , la respuesta se marca en el eje vertical; la X , variable Explicativa, en el eje horizontal. Cada observación, es un punto del gráfico.

II.7.2.1-IDENTIFICACIÓN DEL ASPECTO DEL DIAGRAMA DE DISPERSIÓN

El aspecto general del gráfico viene dado por la dirección, forma y fuerza del mismo:

Dirección: positiva o negativa.

Forma: disposición de los puntos (rectilínea o curvilínea)

Fuerza: cuanto más amorfa sea la disposición de los puntos en el gráfico, menor su relación.

II.7.3-IDENTIFICACIÓN DEL ASPECTO DEL DIAGRAMA DE DISPERSIÓN

Es importante en esta primera caracterización del aspecto del gráfico, identificar observaciones atípicas (aquellas que se distinguen del aspecto general del gráfico)

El diagrama de dispersión sólo muestra el aspecto general de la relación entre las dos variables.

En situaciones no muy evidentes, un simple cambio de escala puede hacernos cambiar la forma de pensar.

II.7.3.1-DESCRIPCION DEL ASPECTO DEL DIAGRAMA DE DISPERSIÓN

Descripciones numéricas:

Se necesita una medida numérica que complemente al gráfico y que, independientemente de las dimensiones de los valores de las variables, nos informe sobre la fuerza y validación de la relación existente.

Una medida es el Coeficiente de Correlación r .

II.7.3.2-CARACTERÍSTICAS DEL COEFICIENTE DE CORRELACIÓN ENTRE LAS VARIABLES DE PEARSON (r)

- r utiliza valores estandarizados, luego no le influyen las unidades. Es decir, tomaría el mismo valor, aunque se cambiara de unidad de medida.

- r se ve afectada por las observaciones atípicas, Sin embargo, cuando se trata obtener un porcentaje de la variación de una variable en otra variable que es explicada, por la variación de otra variable, suele tomarse el cuadrado de r , Siendo r^2 una concepción más ajustada, representando una estadística más confiable, desde el punto de vista conservador de estimación del grado de influencia, en cuanto al ajuste. El inverso de este coeficiente de determinación, es decir, $1 - r^2$ no puede explicarse por esa relación y, en la práctica, de este método, debe ser considerado como debido a otros factores no incluidos en el estudio, como, por ejemplo, en este estudio en particular, errores humanos o el uso de reactivos no adecuados o en la especificación del método en particular que se aplica según la A.W.W.G.
- Una r positiva indica una relación positiva, una negativa, indica una relación negativa entre las variables.
- Valores de r cercanos al 0 indican una relación lineal muy débil.
- La fuerza de la relación lineal aumenta a medida que r se aleja del 0 y se acerca al +1 o al -1.
- La parte de la variable Y que no es explicada por el modelo se llama residual.
- Si la correlación entre las dos variables indica una relación fuerte, sería muy interesante poder “resumir” el gráfico en forma de una ecuación matemática.

- En el caso de una forma lineal, a la recta que ajusta la nube de puntos se le llama recta de regresión.

Esta recta se calcula teniendo en cuenta dos cosas:

Puesto que describe un cambio en la respuesta a medida que cambia la otra variable, se necesita tener presente esta distinción a la hora de calcularla.

Puesto que ninguna recta puede pasar exactamente por todos los puntos, se necesita una manera de construirla que asegure su paso tan cerca de todos los puntos como sea posible.

II.7.4-MODELO DE REGRESIÓN SIMPLE

r^2 , representa la fracción de la variación de Y que se explica por la regresión de Y sobre X y, sirve de medida de bondad de la regresión para explicar la respuesta.

La parte de la variable Y que no es explicada por el modelo se llama residual.

Dibujada la recta de regresión, existe un valor residual para cada dato: $e = y - \hat{y}$.

Una representación típica se muestra a continuación:

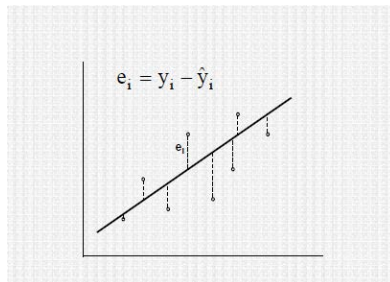


Figura 8-Representación de un modelo lineal simple

II.7.5-MODELO REGRESIÓN MÚLTIPLE

La regresión múltiple expresa el valor de la variable dependiente, como función de las variables independientes $X_1, X_2, \dots, X_k$

La más simple es la regresión lineal y el modelo al que se debieran ajustar los datos es:

$$Y_i = \alpha + \beta_1 X_{1i} + \beta_2 X_{2i} + \dots + \beta_k X_{ki} + \varepsilon_i$$

II.7.6-TEST ESTADÍSTICO DURBIN WATSON

En estadística, el test estadístico Durbin-Watson, desarrollado por el reputado economista Watson, es una estadística de prueba que se utiliza para detectar la presencia de autocorrelación (una relación entre los valores separados el uno del otro por un intervalo de tiempo dado) en los residuos (errores de predicción) de un análisis de la regresión. Lleva el nombre de James Durbin y Geoffrey Watson. La pequeña muestra de la distribución de esta relación se deriva de John Von Neumann (Von Neumann, 1941). Durbin y Watson (1950, 1951) aplicaron esta estadística para los residuales de mínimos cuadrados, y desarrollaron pruebas para la hipótesis nula de que los errores no están correlacionados en serie frente a la alternativa de que siguen un proceso de primer orden autorregresivo. Más tarde, John Denis Sargan y Alok Bhargava desarrollaron varias pruebas estadísticas del tipo von Neumann-Durbin-Watson para la hipótesis nula de que los errores en un modelo de regresión siguen un proceso con una raíz unitaria contra la hipótesis alternativa de que los errores siguen

un proceso estacionario de primer orden autorregresivo (Sargan y Bhargava, 1983).

El cálculo e interpretación del estadístico de Durbin-Watson

Si e_t es el residual asociado a la observación en el tiempo t , entonces la prueba estadística es determinada por la siguiente formula:

$$d = \frac{\sum_{t=2}^T (e_t - e_{t-1})^2}{\sum_{t=1}^T e_t^2},$$

Donde T , es el número de observaciones. Puesto que d es igual a $2(1 - r)$, donde r es la autocorrelación de la muestra de los residuos, $d = 2$ indica que no hay autocorrelación. El valor de d siempre está entre 0 y 4. Si la estadística de Durbin-Watson es sustancialmente menor que 2, hay evidencia de correlación serial positiva. Como regla general, si Durbin-Watson es inferior a 1, puede ser causa de alarma. Valores pequeños de d indican que los términos de error sucesivos están correlacionados positivamente. Si $d > 2$, los términos de error sucesivos son y están correlacionados negativamente. En las regresiones, esto puede implicar una subestimación del nivel de significación estadístico.

II.8-BANDAS Y MODELOS LINEALES UTILIZADOS EN ESTE ESTUDIO

Anteriormente se establecieron antecedentes relacionados con este tipo de estudio y entre ellos destaca el relacionado con el estudio realizado en Colombia, Gómez, & Dalence (2014). En este estudio se determinaron tanto las bandas de las imágenes utilizadas con mayor certeza en los modelos lineales, así como también el tipo de modelo lineal de mejor certeza, en cuanto al coeficiente de determinación r^2

A continuación, se muestra en la tabla 2, este tipo de determinaciones.

Tabla 2-Resumen de los parámetros y Bandas frecuentemente usados estadísticamente

Parámetro	Modelo	r ²	Bandas	Autor
Clorofila	Logarítmico	0.959	4	Tassan (1983)
Clorofila	Logarítmico	0.97	1, 4	Serrano (1995)
Clorofila	Lineal Múltiple	0.99	1, 3	Giardino (2001)
Clorofila	Lineal Múltiple	0.7	2, 4	Ledesma (2013)
DBO	Lineal Múltiple	0.707	1, 2, 3	Yunpeng (2004)
DQO	Lineal Múltiple	0.626	1, 2, 3	Yunpeng (2004)
OD	Lineal Múltiple	0.37	1,5,6	Aiman(2014)
OD	Lineal Múltiple	0.97	1,5,7	Karakaya (2011)
pH	Simple	0.78	6	Hernandez (2013)
pH	Lineal Múltiple	0.705	1,5,6	Aiman(2014)
Temperatura	Simple	0.95	3	Hernandez (2013)
Temperatura	Lineal Múltiple	0.36	5,6,7,8	Karakaya (2011)
Transparencia	Simple	0.601	1,	Aguirre, (2015)
Transparencia	Lineal Múltiple	0.628	2	Hernandez (2013)
Transparencia	Simple	0.98	3,	Gómez(2014)
Transparencia	Simple	0.88	1	Shiebe (1992)
Transparencia	Exponencial	0.716	3	Shiebe (1992)
Transparencia	Lineal Múltiple	0.85	1, 3	Hellweger (2004)
Transparencia	Logarítmico	0.85	3	Hellweger (2004)

II.8-PARAMETROS DE LA CALIDAD DEL AGUA

En términos generales, el concepto de parámetro relativo a la calidad del agua se refiere a valores de componentes disueltos en su seno o no, acotados por un valor que suele llamarse Máximo Permisible. Según Arboleda (et al, 2009) antes de establecer parámetros de índole de máximos permisible del agua, dentro de un contexto relativo a su uso, deben tomarse en cuenta dos aspectos:

No debe ser peligroso su manejo para la salud de los manipuladores y mucho menos para el consumo en productos terminados que contemplen al agua como materia prima. Estableciéndose su máxima exigencia en el consumo de agua potable.

Los sistemas de abastecimiento de agua deben operarse a costos relacionados con el desarrollo sostenible. Es decir, con valores de costos que puedan ser cubiertos, aún, en el caso de rentabilidades sociales, sostenibles. Estas condiciones suelen ser en ocasiones conflictivas, pero la norma que se establezca debe tener en consideración ambos factores. Para cumplir con la primera, el agua no debe contener microorganismos patógenos, ni sustancias tóxicas o nocivas para la salud del ecosistema donde se encuentre, siendo esta una condición imprescindible. Para cumplir con la segunda, las características deben corresponderse con las que no produzcan daños a las aducciones o medios de transportarla, a las redes de su distribución, ni a las industrias o cualquier otra actividad económica pública o privada, y que se pueda lograr esto sin tener que hacer al agua un tratamiento excepcionalmente costoso. Es así, como en este punto, cada país establece sus propias normas, de acuerdo a la calidad de agua cruda que quiera alcanzar y la relación Costo-Beneficio que pueda obtener en la región y, la presencia no deseada de ciertos iones como hierro, sulfatos y carbonatos en el agua que se distribuye para diferentes usos conformes.

De acuerdo a sus aseveraciones, toda agua destinada para el consumo humano o su manipulación por ese ecosistema y todos los demás que albergan vida dependiente del agua, debe cumplir ciertas Normas Bacteriológicas y Fisicoquímicas.

Desde el punto de vista bacteriológico, se ha establecido que no debe mostrar la presencia de *E. coli*. Esta regla no tiene en cuenta los virus entéricos que puedan existir en el agua y que son potencialmente peligrosos. Apunta, que se están

dando pasos significativos para establecer métodos que establezcan aspectos prácticos de bajo costo para determinarlos.

También asevera, que bastaría con eliminar todos los Coliformes Totales incluyendo a los Fecales que, con un desinfectante o medio adecuado, utilizado en la mayoría de los tratamientos de potabilización, se puedan eliminar totalmente.

Es claro que el agua contenida en los embalses; dada su interacción en los diferentes suelos a través de las diferentes escorrentías por donde cursa; en donde se le da diferentes usos al suelo, puedan contener o no Coliformes. Su determinación oportuna definiría el tipo de procedimiento bacteriológico a utilizar en las plantas de potabilización.

Estima que por direccionamientos específicos de La Organización Mundial de la Salud (OMS) y en conjunto con organizaciones de renombre como La Agencia de Protección Ambiental (EPA) Y la Comunidad Económica Europea (CEU), se han establecido Patrones de referencia para la adopción de valores de máximos permisibles de 86 componentes disueltos en el agua o, que bien puedan establecerse, aun de naturaleza organoléptica y, sin dejar de tomar en cuenta bien rigurosa, compuestos orgánicos disueltos, tales como los pesticidas, agentes fenólicos y bencénicos y radioactivos.

No obstante, por ser un área, esta de la calidad del agua, uno muy amplio; para los fines de esta investigación solo se tomarán en cuenta, para definirlos, y no porque sean relativamente importantes en relación con otros, sino más bien, por ser parámetros que, a solicitud de los administradores locales del sector hídrico, muestran

especial interés en ellos, debido a que son parámetros de control que han incidido cronológicamente en los costos de potabilización. A continuación, una descripción sucinta de tales parámetros:

II.8.1-COLIFORMES TOTALES

Aunque los términos coliforme total y coliforme fecal carecen de significado taxonómico, su determinación en las aguas de un embalse es de importancia patológica entérica y tienen sentido metodológico y solo cobran notabilidad cuando se definen las condiciones en que se hace su detección, para la aplicación de procesos de desinfección. Se relacionan con las propiedades del medio de cultivo, temperatura y tiempo de incubación, técnicas referentes al método de determinación. Su valor esta conferido a determinar el número más probable de crecimiento, de manera probabilística, en un medio de cultivo que especifica el método, bajo condiciones y temperatura específicas.

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.

Coliforme significa con forma de coli, refiriéndose a la bacteria principal del grupo, *Escherichia Coli*, descubierta por el bacteriólogo alemán Theodor Von Escherich en 1860. Von Escherich la bautizó como *bacterium coli* ("bacteria del intestino", del griego *κολον*, *kolon*, "intestino"). Con posterioridad, la microbiología sistemática nombraría el género *Escherichia* en honor a su descubridor.

El grupo de los coliformes incluye bacterias en forma de bacilos, gram negativos, con las siguientes propiedades bioquímicas: oxidasa negativo y capacidad de fermentar lactosa, con producción de gas en 48 horas a una temperatura de 37 °C.

El grupo coliforme está formado por los siguientes géneros:

Escherichia, *Klebsiella*, *Enterobacter*, *Citrobacter*.

No todos los autores incluyen al género *Citrobacter* dentro del grupo coliforme.

La *Escherichia Coli* de origen animal y la de origen humano son idénticas. Sin embargo, algunos investigadores han encontrado que las bacterias del género *Rodococcus* se asocian solamente a la contaminación fecal por animales.

La presencia de coliformes en el suministro de agua es un indicio de que el suministro de agua puede estar contaminada con aguas negras u otro tipo de desechos en descomposición. Generalmente, las bacterias coliformes se encuentran en mayor abundancia en la capa superficial del agua o en los sedimentos del fondo.

Los niveles recomendados de bacterias coliformes fecales son:

Agua potable: 0 colonias por 100 ml de la muestra de agua.

Natación: menos de 200 colonias por 100 ml de la muestra de agua

Navegar/Pescar: menos de 1,000 colonias por 100 ml de la muestra de agua

II.8.2-CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA

La Conductividad Eléctrica es la capacidad de un cuerpo de permitir el paso de la corriente eléctrica a través de sí. También es definida como la propiedad natural característica de cada cuerpo que representa la facilidad con la que los electrones

pueden pasar por él. La conductividad varía con la temperatura (es una de sus características más importante).

La conductividad es la inversa de la Resistividad, por tanto, su unidad es el S/m (siemens por metro), no se debe confundir con la conductancia que es $G=1/R$ (inversa de la resistencia). Generalmente, un conductor tiene una conductividad (permisividad eléctrica) de 1 Siemens, si una diferencia de potencial entre sus extremos provoca una corriente de 1 Amperio.

La conductividad en medios líquidos (disolución) está relacionada con la presencia de sales en solución, cuya disociación genera iones positivos y negativos capaces de transportar la energía eléctrica si se somete el líquido a un campo eléctrico. Estos conductores iónicos se denominan electrolitos o conductores electrolíticos. La conductividad es el parámetro utilizado para medir la concentración de iones y la actividad de una solución.

Las determinaciones de la conductividad reciben el nombre de determinaciones conductimétricas y tienen muchas aplicaciones, algunos ejemplos:

En electrólisis, ya que el consumo de energía eléctrica en este proceso depende en gran medida de ella.

En estudios de laboratorio para determinar el contenido de sal y minerales de distintas diluciones o concentraciones durante la evaporación del agua, por ejemplo, en el agua de calderas o en equipos de bombeo de gran capacidad que usan agua de en sus sistemas de enfriamiento, puesto que pueden ser determinadas por mediciones de la conductividad, para medir el coeficiente de obstrucción de esos sistemas de

enfriamiento. También se determina para la selección de tuberías de transporte líquido.

Para determinar las solubilidades de electrolitos escasamente solubles y para hallar concentraciones de electrolitos en soluciones por titulación.

En control de plantas de producción de agua potable.

En determinaciones de la salinidad del agua de mar.

La conductividad eléctrica se utiliza para determinar la salinidad (contenido de sales) de suelos y substratos de cultivo, ya que se disuelven éstos en agua y se mide la conductividad del medio líquido resultante. Suele estar referenciada a 25 °C y el valor obtenido debe corregirse en función de la temperatura.

En el desarrollo de los procesos de eutroficación suele ser observada como un indicativo de su tendencia.

Los conductímetros pueden incorporar la medición de otros parámetros como: pH, temperatura, turbidez y otros parámetros asociados con ella.

II.8.2.1-RELACIÓN DE LAS UNIDADES DE MEDIDA DE CONDUCTIVIDAD

$1 \text{ S/cm (siemens/centímetro)} = 1000 \text{ } \mu\text{S/cm} = 1000000 \text{ } \mu\text{s/cm} = 1000 \text{ Ec} = 10000 \text{ CF} = 1 \text{ mho/cm} = 0,01 \text{ m, mho/m} = 500.000 \text{ ppm TDS.}$

Una aplicación directa de la conductividad eléctrica, es la utilizada en la determinación de los sólidos totales disueltos, ya que esta aumenta proporcionalmente a su concentración.

II.8.3-NITRÓGENO TOTAL

El Nitrógeno Total es un indicador utilizado en química analítica cuantitativa. Refleja la cantidad total de nitrógeno en el agua analizada, representa la suma del nitrógeno orgánico en sus diversas formas (proteínas y ácidos nucleicos en diversos estados de degradación, urea, aminas, y otros.) y el ion amonio NH_4^+ .

Es un parámetro importante en embalses eutroficados, su aumento o disminución constituyen un factor limitante del crecimiento del primer nivel trófico. Ya que el nitrógeno en sus diversas formas de oxidación representa un nutriente para la microflora, además mide el nitrógeno capaz de ser nitrificado a nitritos y nitratos y, posteriormente y en su caso, desnitrificado a nitrógeno gaseoso. No incluye, por tanto, los nitratos ni los nitritos. En el volumen de muestra puede determinarse un contenido de nitrógeno Kjeldahl de hasta 1000 mg. Si se emplea un volumen de ensayo de 10 ml, corresponderá a una concentración en la muestra de hasta 1000 mg/l.

Límite de detección 1 mg/litro cuando se utiliza un volumen de ensayo de 100 ml.

También se le conoce como el índice de Kjeldahl, nombre procede del método creado por el químico danés Johan Kjeldahl en 1883 que, en esencia, digiere el agua en condiciones ácidas enérgicas con peroxidisulfato, hasta pasar todas las especies a amonio, el cual se mide por valoración del NH_3 producido por destilación, o por fotometría. Por tanto, sus valores se determinan con la toma aséptica de muestras en los sitios o cuerpos de agua a determinásele.

II.8.4-DEMANDA BIOLOGICA DE OXÍGENO (DBO)

La Demanda Biológica de Oxígeno (DBO) es un parámetro que mide la cantidad de di oxígeno consumido, al degradar la materia orgánica de una muestra líquida.

Es la materia susceptible de ser consumida u oxidada por medios biológicos que contiene una muestra líquida, disuelta o en suspensión. Se utiliza para medir el grado de contaminación; normalmente se mide transcurridos cinco días de reacción (DBO)₅ y se expresa en miligramos de oxígeno diatómico por litro (mg O₂/l).

El método de ensayo se basa en medir el di oxígeno consumido por una población microbiana en condiciones en las que se han inhibido los procesos fotosintéticos de producción de di oxígeno en condiciones que favorecen el desarrollo de los microorganismos. La curva de consumo de di oxígeno suele ser al principio débil y después se eleva rápidamente hasta un máximo sostenido, bajo la acción de la fase logarítmica de crecimiento de los microorganismos.

Es un método aplicable en aguas continentales (ríos, lagos o acuíferos) y residuales, aguas de cualquier otra procedencia que pueda contener una cantidad apreciable de materia orgánica. Este ensayo es muy útil para la apreciación del funcionamiento de las estaciones depuradoras.

No es aplicable, sin embargo, a las aguas potables, ya que al tener un contenido tan bajo de materia oxidable la precisión del método no sería adecuada. En este caso se utiliza el método de oxidabilidad con permanganato de potasio. Pero se aplica en embalses y esta normado.

Según Mc Kinney (1962), «El test de la DBO fue propuesto por el hecho de que en Inglaterra ningún curso de agua demora más de cinco días en desaguar (desde su nacimiento a su desembocadura). Así la DBO es la demanda máxima de di oxígeno que podrá ser necesaria para un curso de agua en ese país». Pero fue adoptado por muchos países.

El método pretende medir, en principio, exclusivamente la concentración de contaminantes orgánicos. Sin embargo, la oxidación de la materia orgánica no es la única causa del fenómeno, sino que también intervienen la oxidación de los nitritos y de las sales amoniacales, susceptibles de ser también oxidadas por las bacterias en disolución. Para evitar este hecho se añade N-aliltiourea como inhibidor. Además, influyen las necesidades de dióxígeno originadas por los fenómenos de asimilación y de formación de nuevas células

También se producen variaciones significativas según las especies de gérmenes, la concentración de estos y su edad, y la presencia de bacterias nitrificantes y de protozoos consumidores propios de di oxígeno que se nutren de las bacterias, entre otras causas. Por todo ello este test ha sido constantemente objeto de discusión: sus dificultades de aplicación, interpretación de los resultados y reproductibilidad se deben al carácter biológico del método.

Valores por encima de 30 mgO₂/litro pueden ser indicativos de contaminación en aguas continentales, aunque las aguas residuales pueden alcanzar una DBO de miles de mgO₂/litro.

II.8.5-DEMANDA QUIMICA DE OXIGENO (DQO)

La demanda química de oxígeno (DQO) es un parámetro que mide la cantidad de sustancias susceptibles de ser oxidadas por medios químicos que hay disueltas en suspensión en una muestra líquida. Se utiliza para medir el grado de contaminación y se expresa en miligramos de oxígeno diatómico por litro (mg O₂/l). Aunque este método pretende medir principalmente la concentración de materia orgánica, sufre interferencias por la presencia de sustancias inorgánicas susceptibles de ser oxidadas como sulfuros, sulfitos, yoduros, y otros, que también se reflejan en la medida.

Es un método aplicable en aguas continentales (ríos, lagos o acuíferos), aguas residuales, aguas pluviales o agua de cualquier otra procedencia que puedan contener una cantidad apreciable de materia orgánica. Este ensayo es muy útil para la apreciación del funcionamiento de las estaciones depuradoras. No es aplicable, sin embargo, a las aguas potables, ya que al tener un contenido tan bajo de materia oxidable la precisión del método no sería adecuada. En este caso se utiliza el método de oxidabilidad con permanganato potásico.

La DQO varía en función de las características de las materias presentes, de sus proporciones respectivas, de sus posibilidades de oxidación y de otras variables. Por esto la reproductividad de los resultados y su interpretación no pueden ser satisfechos más que en condiciones de metodología de ensayo bien definidas y estrictamente respetadas.

El valor obtenido es siempre superior a la demanda biológica de oxígeno (aproximadamente el doble), ya que se oxidan por este método también las sustancias no biodegradables. La relación entre los dos parámetros es indicativa de la calidad del agua. En las aguas industriales puede haber una mayor concentración de compuestos no biodegradables.

II.8.6-FÓSFORO TOTAL

El Fósforo es un componente esencial para la vida, por lo cual es uno de los nutrientes fundamentales para el crecimiento vegetal y animal, formando parte del ADN, ATP, y las moléculas de fosfolípidos de las membranas celulares. Tiene su origen natural en la erosión de las rocas y la degradación de la materia orgánica (Wetzel 2001). El fósforo ocurre en aguas naturales y residuales principalmente en forma particulada inorgánica u orgánica y en una menor fracción en forma disuelta, orgánica (nucleótidos, polinucleótidos, sustancias húmicas, poli, meta y ultra fosfatos) e inorgánica (PO_4^{3-} , HPO_4^{2-} , H_2PO_4^-) (Arocena & Conde 1999; Wetzel 2001). La concentración de Fósforo Total mide la cantidad de fósforo disponible en forma orgánica e inorgánica, disuelta y particulada en los sistemas acuáticos.

El fósforo constituye en muchos sistemas acuáticos el nutriente limitante de la producción primaria, siendo determinante del estado trófico de los mismos. El aumento de este elemento en el medio acuático está relacionado a diversas actividades humanas, principalmente con el uso de fertilizantes y detergentes (Arocena 2015). El aporte de materia orgánica proveniente de vertidos domésticos,

agrícolas e industriales constituye una de las perturbaciones más comunes de los ambientes acuáticos. La descomposición de la materia orgánica provoca la reducción de la concentración de oxígeno en el agua y aporta nutrientes, principalmente nitrógeno y fósforo. Este fenómeno da origen a un proceso que se denomina eutrofización. La proliferación excesiva de plantas acuáticas, microalgas y cianobacterias constituye uno de los efectos más notorios de este fenómeno. Una de las principales consecuencias es el desarrollo de floraciones de cianobacterias potencialmente tóxicas y consumidoras del O_2 molecular disuelto en el agua, las cuales afectan la calidad del agua para utilización por el hombre y la conservación de la biodiversidad. La eutrofización se ha convertido en la problemática más extendida tanto a nivel nacional (Scasso & Mazzeo 2000), como mundial (Hosper 1998) de los sistemas acuáticos.

La cobertura y alcance en la toma de muestras está determinada por la disposición geográfica y emplazamiento de los embalses. La determinación conforme de su nivel de concentración se acostumbra realizarla en los predios de los caudales aportantes.

II.8.7-pH

El pH es una medida de acidez o alcalinidad de una disolución. El pH indica la concentración de iones de hidrógeno presentes en determinadas disoluciones. La sigla significa potencial de hidrógeno o potencial de hidrogeniones. Y conceptualmente está definido como:

El logaritmo negativo en base₁₀, de la actividad de los iones hidrógeno:

En los embalses está relacionado directamente con la alcalinidad o acidez de las aguas contenidas en ellos. Guarda relación directa con la flora y fauna que se desarrolla dentro de ellos.

El valor del pH se puede medir de forma precisa mediante un potenciómetro, también conocido peachímetro, instrumento que mide la diferencia de potencial entre dos electrodos: Un electrodo de referencia generalmente de plata o cloruro de plata y un electrodo de vidrio que es sensible al ion de hidrógeno.

A 25⁰ C, un pH igual a 7 es neutro, uno menor que 7 es ácido, y si es mayor que 7, es básico. A distintas temperaturas, el valor de pH neutro puede variar debido a la constante de equilibrio del agua: K_w . Esto establecido en una escala universal determinada entre 1 y 14 unidades adimensionales.

Es de altísima importancia en todos los procesos bioquímicos y químicos que se desarrollan en un embalse y, junto a la temperatura juega un papel importante en todos ellos. La determinación del pH es uno de los procedimientos analíticos más importantes y más utilizados en química y bioquímica. El pH determina muchas características notables de la estructura y de la actividad de las moléculas, por lo tanto, del comportamiento de células y organismos. Un pH alcalino promueve el crecimiento de microalgas y por tanto un plancton enriquecido.

II.8.8-PLANCTON

Se denomina plancton (del griego *πλαγκτός* [planctós], ‘errantes’) al conjunto de organismos, principalmente microscópicos, que flotan en aguas saladas o dulces, más

abundantes hasta los 200 metros de profundidad, aproximadamente. Se distingue del necton, palabra que denomina a todos los nadadores activos y del neuston, los que viven en la interface o límite con el aire, es decir, en la superficie. Plancton se refiere entonces a los organismos autótrofos que viven en suspensión en el agua, diferenciándose del bento, referido este término a los del fondo de ecosistemas acuáticos.

Se suelen diferenciar, de acuerdo al tipo de células, es decir, vegetal con capacidad fotosintética o animal. Determinando en este caso una notable diferenciación que los clasifica en fitoplancton para los de capacidad fotosintética y zooplancton para aquellos organismos autotróficos con células de tipo animal. Generalmente el zooplancton se alimenta del fitoplancton.

El fitoplancton juega un papel central en la estructura y funcionamiento de los ecosistemas de agua dulce (DODSON, 2009). Algas y Cianobacterias son importantes componentes de la producción primaria y pueden ejercer una fuerte influencia sobre los otros componentes del ecosistema (por ejemplo, zooplancton, micrófitos y macroinvertebrados). La calidad y cantidad del fitoplancton dependen en parte de la carga de nutrientes. Por lo tanto, el uso de fitoplancton para la evaluación de la calidad del agua (especialmente la evaluación del posible impacto de la eutrofización) tiene una larga historia (CARLSON, 1977). Algunos métodos utilizan la abundancia de fitoplancton (típicamente como clorofila a), mientras que otros examinan la estructura de la comunidad Fito plantónica (especies dominantes e indicadoras) (HEINONEN, 1980; BRETTUM & ANDERSEN, 2005; REYNOLDS,

2006; REYNOLDS., 2002). También para fines diversos, se utiliza el conteo directo de números de células por mililitro (Cel/ml). Según (Hosper H. 1998. Stable states, buffers and switches: an ecosystem approach to the restoration and management of shallow lakes in the Netherlands. Wat. Sci. Tech.

II.9-HORIZONTES Y METAS DE LAS CIENCIAS ESPACIALES EN EL MEDIO AMBIENTE

Para los fines de mayor número de aplicaciones y aumento de la confiabilidad en las determinaciones que se logran con el uso de la teleducación a través de sensores remotos, estos métodos enfocan en sus futuras aplicaciones, mejorar dos componentes:

Aumento de la Resolución, tanto espacial, en el caso de los satélites orbitales como la radiométrica y, temporal en cualquier estudio. Cuestión que resulta ventajosa, dado que los sistemas de percepción remota difieren en la resolución, es decir, el nivel de detalle con que pueden capturar las imágenes, su frecuencia temporal, “finura espectral”, etc. Desde este punto de vista, podemos considerar cuatro diferentes tipos de resolución: espacial, espectral, radiométrica y temporal. Entiéndase aquí que la resolución espacial se refiere a la finura de detalles visibles en una imagen, cuanto menor es el área terrestre representada por cada píxel en una imagen digital mayores son los detalles que pueden ser captados y mayor es la resolución espacial. Definitivamente, se pueden observar imágenes de una misma región a, aumentando la cantidad de píxeles por m², obteniéndose mejoras en resolución espacial. Y en el caso de estos satélites se corresponde como; baja, mediana y alta, perteneciendo

respectivamente al MODIS 1.1 km, LANDSAT-5, 30 m y QUICKBIRD, 0.60 m. Existen diferentes factores que influyen en la resolución espacial: además de los obviamente asociados al sensor, como es el poder resolutivo del sistema óptico, debemos considerar las influencias atmosféricas, presencia de humo, neblina, bajos niveles de iluminación, y otros.

Y la otra tendencia, bien marcada, está relacionada con el costo de las plataformas diversas que hoy en día se utilizan. Claro está, que cuando se trata de satélites en órbita, se comprende que el uso de ellos en las ciencias ambientales, representa un subproducto utilizable de incommensurable valor, pero aquí proyectos de ese tipo están soportados por una rentable actividad económica, representada por el uso en las telecomunicaciones. Sin embargo, la incipiente tecnología de Drones, ofrecen plataformas de uso local con resoluciones de apenas metros, sobre la superficie que se requiera estudiar localmente.

Adicionalmente, se puede estimar que, con el aumento de la resolución, aumentará la certeza en el grado existente o no de una correlación establecida entre variables cotejadas, tal como es el caso de esta investigación.

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

III.1-TIPO DE INVESTIGACIÓN

En términos generales, esta investigación es de tipo correlacional, ya que se tiene como propósito generar modelos matemáticos lineales multivariantes, para relacionar los parámetros fisicoquímicos medidos en el embalse Pao Cachinche durante el periodo 1996-2016 con la reflectancia superficial emitida por el cuerpo de agua en las regiones espectrales ópticas e infrarrojo cercano.

III.1-DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

Según (Hernández, Fernández y Baptista, 2014), la investigación no experimental es aquella que se realiza sin manipular deliberadamente variables. Es decir, es Una investigación donde no hacemos variar intencionalmente las variables independientes. Lo que hacemos en la investigación no experimental es observar fenómenos tal y como se dan en su contexto natural, para después analizarlos. Como señala (Kerlinger 1979,). "La investigación no experimental o ex-post-facto es cualquier investigación en la que resulta imposible manipular variables o asignar aleatoriamente a los sujetos o a las condiciones". De hecho, no hay condiciones o estímulos a los cuales se expongan los sujetos del estudio. Los sujetos son observados en su ambiente natural, en su realidad.

En un experimento clásico experimental, el investigador construye deliberadamente una situación a la que son expuestos varios individuos o datos. Esta situación consiste en recibir un tratamiento, condición o estímulo bajo determinadas circunstancias, para después analizar los efectos de la exposición o aplicación de dicho tratamiento o condición. Por razones propias de propósitos, en un experimento se ‘construye’ una realidad.

En cambio, en un estudio no experimental no se construye ninguna situación, sino que se observan situaciones ya existentes, no provocadas intencionalmente por el investigador. En la investigación no experimental las variables independientes ya han ocurrido y no pueden ser manipuladas, el investigador no tiene control directo sobre dichas variables, no puede influir sobre ellas porque ya sucedieron, al igual que sus efectos.

Por tanto, el diseño de esta investigación es de tipo no experimental, ya que las mediciones de los parámetros fisicoquímicos se realizan en un entorno natural sin alterar las condiciones que dan origen a estos componentes del agua, así como la medición de la reflectancia superficial del cuerpo de agua se lleva a cabo en forma remota por los sensores de los satélites Landsat. En tal sentido, se buscó determinar a un grupo de imágenes seleccionadas de acuerdo a ciertos criterios, el escogimiento de imágenes satelitales se hará de acuerdo a dos criterios: **1^{er}**, El correspondiente a una misma estación, se adoptará el correspondiente a uno considerado como, periodo estival, o bien de estación seca, comprendido entre los meses de octubre y junio. En el entendido que, la pluviometría promedio en estos meses en la zona es de menor

intensidad; lo que supone, menor actividad en la dinámica de mezclas de las corrientes del embalse, por tanto, mayor estabilidad en los valores de cada parámetro medido en sitio; 2^{do}, Seleccionando la menor cobertura de nubes, aerosoles y niebla, en las imágenes. Este criterio se adoptó, dado que, la proximidad del embalse; aunque está situado en el lado sur de la Cordillera de la Costa; supone mayor nubosidad por la evaporación marítima.

III.1-ETAPAS DE LA INVESTIGACIÓN

Esta investigación se desarrolla en cuatro etapas, en cada una de ellas se transita por varios procesos investigativos, se detallarán en cada etapa estos procesos.

III.1.1-PRIMERA ETAPA

Se consideró como la etapa descriptiva de esta investigación. Serán propias de ellas una descripción oportuna del embalse. Indicando: Sus dimensiones, características geográficas, su ubicación geográfica, sus afluentes y, sobre todo, su área de influencia ambiental indicando los sitios contaminantes de influencia sobre él. Después de georreferenciadas las imágenes; siendo esta las correspondientes al periodo de menor pluviometría, es decir, procurando la estación seca, lo que supone una mayor estabilidad de partículas disueltas; se procedió a pasar a una segunda etapa.

III.1.2.-SEGUNDA ETAPA:

Correspondió al procesamiento preliminar de las imágenes. Aunque las imágenes descargadas son de una versión corregida geométricamente por el USGS; sin

embargo, las correcciones absolutas radiométricas, topográficas y atmosféricas aplicadas a cada imagen se ejecutan en el entorno de la computadora de procesamiento de imágenes satelitales, usando el software Envi 4.7. Las correcciones relativas entre las imágenes de los diferentes sensores del conjunto de satélites Landsat incluyen: Correcciones geométricas y radiométricas.

Para verificar la georreferenciación se empleó el módulo ArcMap del software Arcgis versión 10.1 (Corporación ESRI).

El archivo se procesó digitalmente mediante el software ERDAS, con el cual se unieron y, a su vez se descompusieron en las siete bandas de una sola imagen.

Se procedió también en esta etapa a calcular valores de estadística descriptiva, tales como la Media, la Desviación Estándar y El Coeficiente r^2 , todos ellos útiles en el desarrollo de la etapa de evaluación del método y uso de la regresión. Necesarios para determinar la viabilidad del modelo.

III.1.3-TERCERA ETAPA

En esta etapa se estimaron los Modelos Matemáticos Lineales Mixtos para los siguientes parámetros fisicoquímicos y biológicos: Fósforo Total (F), Nitrógeno Total, (N_2), Plancton (número de células/ml), Demanda Biológica de Oxígeno (DBO_5), Demanda Bioquímica de Oxígeno (DQO), Coliformes Totales (NMP), Conductividad Eléctrica, y pH. Todos referidos a la Reflectancia, la cual fue estimada según la siguiente fórmula:

$$\rho_{\lambda} = \frac{\pi \cdot L_{\lambda} \cdot d^2}{ESUN_{\lambda} \cdot \cos \theta_s}$$

Dónde:

ρ_{λ} = Reflectancia planetaria TOA (unidimensional)

π = constante =3.1416

L_{λ} =la apertura del sensor, medido como radianza espectral [W/(m² μm)].

d = distancia desde el sol a la tierra (unidades astronómicas).

$ESUN_{\lambda}$ = Irradianza media solar exoatmosférica [W/ (m² μm)].

θ_s = Angulo solar Zenit (grados sexagesimales).

III.1.4-CUARTA ETAPA

Esta etapa correspondió a la evaluación del ajuste de los valores de cada parámetro, obtenidos a partir de la reflectancia como variable dependiente de los parámetros físico químicos obtenidos en campo, utilizando el modelo lineal mixto. En síntesis, a la evaluación definitiva del modelo. El ajuste se determinó porcentualmente, atendiendo a índices estadísticos como el Test Estadístico Durbin Watson. Este índice; a diferencia de estar dependiendo de apreciaciones graficas como la pendiente o, el agrupamiento de datos y la escala que fije el software estadístico; proporciona una evaluación cuantitativa del error, independientemente de las subjetividades que genere el analizador para su toma de decisiones. Y así, entre valores que determina el software dentro de un rango se tomaron las correspondientes

Es de hacer notar, lo significativo e importante que resultó para esta investigación, el apoyo incondicional del personal del sector hídrico en general, presente en el estado Carabobo, para la evaluación de esta última etapa, sus aportes, en las determinaciones

logradas, permitieron dilucidar algunos aspectos considerados un tanto difusos, para la aprobación del modelo que se experimentó en esta investigación.

Es oportuno e importante, mencionar que para la determinación estadística descriptiva y la correlación múltiple de modelos multivariantes se hizo uso del software Statics Grafic, elemento de condensadas aplicaciones estadísticas informáticas de ahorro de tiempo y precisión.

CAPITULO IV

PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

IV.1 DESCRIPCION DEL AREA DE ESTUDIO

El Embalse Pao Cachinche, que se muestra en las figuras 9 y 10, son ubicaciones georeferenciadas, fue culminado en año de 1969, con fines de riego agrícola, luego se adoptó su uso a la producción de agua cruda, para alimentar la Planta de Potabilización Dr. Alejo Alejo Zuloaga, dado el altísimo índice demográfico e industrial desarrollado en los estados Aragua, Carabobo, y Cojedes, que son abastecidos por el Sistema Regional del Centro I. Con una elevación del Cimacio de 72 metros, presenta una estructura de tapón de roca volcada sobre un manto y núcleo arcilloso de una longitud de 102 metros. En él convergen cuatro ríos principales, conocidos como, en orden de caudal aportante, Río Paíto, quien determina su brazo norte, Río Chigua, determina este. su brazo oeste y los ríos Paya, San Pablo y Pirapira con afluencia norte, pero de procedencias desde el este, conforma el tercer brazo geográfico de su morfología. Su nombre es homónimo a un lugar de la antigua confluencia de los tres brazos, desaparecido por su llenado. Desde el punto de vista político geográfico, pertenece a los estados Carabobo y Cojedes, ya que se emplaza en sus límites, determinados anteriormente por el cauce de los ríos Chirgua y Pao.

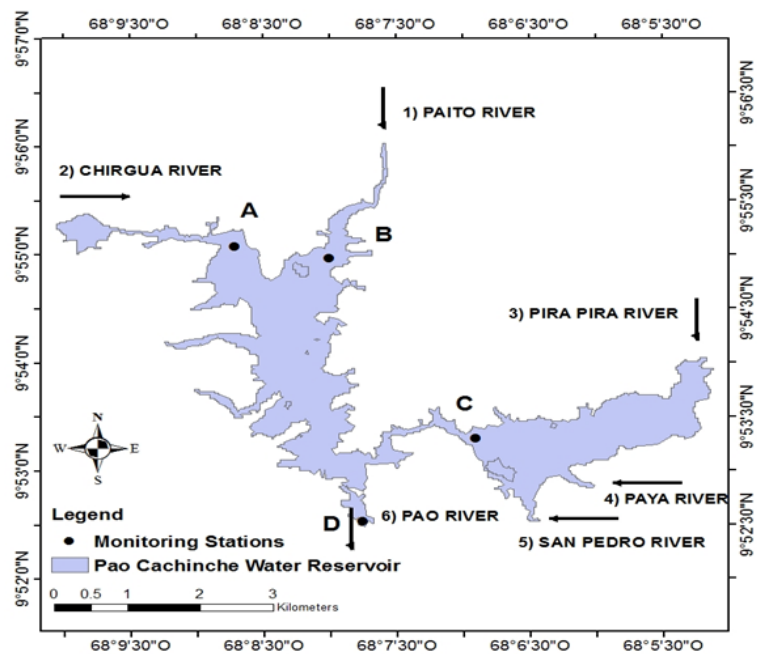


Figura 9- Ubicaciones geo-referenciadas Embalse Pao Cachinche y puntos de toma de parámetros



Figura 10-Ubicación político-geográfica del Embalse Pao Cachinche.

Posee una profundidad media de 28 metros, siendo su mayor profundidad la determinada en las áreas de la Torre Toma Selectiva que posee; de nueve compuertas, 8 escalonadas cada 3.5 metros, características que permite seleccionar el agua cruda a captar, dependiendo de sus condiciones y calidad y, una de fondo, para mantenimiento y desalojo de sedimentos en el ara de la torre toma selectiva. Posee un aliviadero de tipo sumergido con una cota de alivio correspondiente a los 353, 26 m.s.n.m. cubriendo un espejo de agua de 2.524 hectáreas para esa cota y, 2826 hectáreas para su cota de resguardo, ubicada en los 354, 5 m.s.n.m., estimados nominalmente. Su ubicación geográfica, desde el punto de vista altimétrico, lo sitúan en las referidas cotas mencionadas, muy por debajo de las cotas de los emplazamientos de los ecosistemas

humanos, localizados en promedio en las cotas de 430 m.s.n.m, es decir, muy por debajo de ellos, lo que determina que todas las escorrentías de los sistemas lénticos drenan hacia él, con una pendiente de llegada de hasta 45% y caudales de llegada de rendimiento medio de 2,004 m³/s y, 6304 m³/s, en Límite de Tormenta Máxima, determinados por el método de Gumbells.

Posee una heterogénea y variada diversidad biológica que ha variado con el tiempo, debido a la alta carga de nutrientes que recibe de las actividades antrópicas de los emplazamientos humanos descritos. Situación que lo ubica dentro de su condición como Hipertrófico, condición que ha adquirido dentro del periodo de estudio que se contempló en esta investigación. Pero las causas de mejor determinación, se corresponden con una condición de baja operación en unas de sus plantas receptoras

de aguas residuales municipales, llamada La Mariposa, emplazamiento de tratamiento hoy en día no operativo, por desmantelamiento hamponíl. Cuestión que permite la recepción de caudales poluentes cargados de nitrógeno y fósforo.

Se considera importante mencionar dos aspectos de suma severidad, desde el punto de vista operativo y de conservación de sus áreas de inundación. La primera está referida al cambio de uso del suelo de su área de protección, la cual esta demarcada inteligiblemente. Pero, en ellas se han desarrollado y permitido usos agropecuarios (granjas porcinas y avícolas y agricultura artesanal, tala y quema de bosque adyacentes para el desarrollo de conucos), situación que ha incrementado la actividad sedimentaria y contribuido a acelerar su proceso de eutroficación. La segunda está estrictamente relacionada con el desarrollo de un trasvase de impulsión que drena en el cauce del Rio Cabriales, caudales de aguas hipertróficas, proveniente desde el Lago Los Tacariguas, estimados en $3.5 \text{ m}^3/\text{s}$ en una etapa inicial, para un total de $5.0 \text{ m}^3/\text{s}$ en su etapa final de construcción. Cuestión que tiende a comprometer su estabilidad dado sus alturas de reserva en el aliviadero. Y sin dejar de tomar en cuenta que, esas aguas de trasvase, no poseen ningún tratamiento, contribuyendo de este modo, a los procesos de eutroficación. Por último, se determinó que su compuerta de fondo no está operativa. No permitiendo de modo alguno, el drenaje de sedimentos en áreas adyacentes a su Torre Toma Selectiva. Estas características esbozadas en este trabajo de investigación permitieron determinar que su escogencia para este estudio de modelación matemática es el más adecuado, desde el punto de vista cronológico y lo profuso de su polución.

IV.2-SELECCIÓN DE LAS IMÁGENES DE SATÉLITES LANDSAT

Las características de las imágenes satelitales de Landsat se muestran en la Tabla 3. Los datos de sensores remotos son imágenes de números digitales calibrados (Chander et al., 2009) y reflectancia de la superficie correspondiente a Landsat Collection 1 Level-1 y Landsat Collection Level-2 (USGS). , 2018a; USGS, 2018b), respectivamente, se descargaron del siguiente sitio web: <https://earthexplorer.usgs.gov/>.

Tabla 3-Características de las imágenes de satélite Landsat

Nº	1	2	3	4	5	6	7
1	LT50050531996299XXX02	1996-10-25	14:12:26.1290060Z	18.00	9	124.94450537	51.52871601
2	LT50050531997125AAA02	1997-05-05	14:20:38.5360810Z	50.00	9	75.28557916	57.71333274
3	LT50050531998032CPE00	1998-02-01	14:28:28.6110190Z	33.00	9	127.94531961	46.11991603
4	LT50050531999019CPE00	1999-01-19	14:31:37.3780560Z	23.00	9	132.94664692	45.23014868
5	LT50050532000182XXX02	2000-06-30	14:45:26.0198689Z	7.00	9	137.52485114	47.22916723
6	LT50050532001008AAA02	2001-01-08	14:32:22.5760750Z	10.00	9	135.84219087	44.77755780
7	LE70050532002051AGS00	2002-02-20	14:41:26.1414958Z	22.00	9	122.73905080	52.13911206
8	LE70050532003022PFS00	2003-01-22	14:41:05.9709036Z	10.00	9	134.07217263	47.15930857
9	LE70050532004073ASN01	2004-03-13	14:41:51.4914735Z	26.00	9	111.11140194	57.01474688
10	LE70050532005075ASN02	2005-03-16	14:42:18.9329297Z	9.00	9	109.44234858	57.70389275
11	LE70050532006350EDC00	2006-12-16	14:42:47.3787022Z	22.00	9	142.06462940	47.39871653
12	LE70050532007033EDC00	2007-02-02	14:42:57.7703492Z	3.00	3	130.64547180	48.91437918
13	LE70050532008020EDC00	2008-01-20	14:42:57.7020068Z	20.00	9	135.08382735	47.19709575
14	LE70050532009102ASN00	2009-04-12	14:42:56.6480101Z	45.00	9	90.15646316	62.27902760
15	LE70050532010073EDC00	2010-03-14	14:44:44.5195357Z	15.00	9	111.34110186	57.80472117
16	LT50050532011100CHM00	2011-04-10	14:42:23.8040810Z	52.00	9	92.02577526	61.92475822
17	LE70050532012047EDC00	2012-02-16	14:46:44.9033176Z	8.00	9	125.97656640	52.29227579
18	LE70050532013033EDC00	2013-02-02	14:48:49.6318892Z	11.00	9	131.92278103	50.15978418
19	LC80050532014076LGN01	2014-03-17	14:53:05.1244880Z	16.84	9	111.02915450	60.45368381
20	LO80050532015063LGN00	2015-03-04	14:52:20.8148112Z	13.13	9	119.09567247	57.19634293
21	LC80050532016018LGN00	2016-01-18	14:52:41.9360648Z	6.09	9	138.18721946	48.77317194

1) el código de identificación de la escena, 2) la fecha de adquisición, 3) el tiempo del centro de la escena, 4) la cobertura de la nube, 5) la calidad de la imagen, 6) el ángulo del azimut solar y 7) el ángulo del cenit solar.

Los satélites seleccionados son el grupo de satélites Landsat; utilizando imágenes de tres de estos: 1) Landsat 5 (L5), 2) Landsat 7 (L7) y 3) Landsat 8 (L8) (Figura 2); cuyos sensores son: L5: Thematic Mapper (TM), L7: Enhanced Thematic Mapper (ETM) y L8: Operational Land Imager (OLI); respectivamente. Se han adquirido 21 imágenes Landsat correspondientes a una sola escena; donde se encuentra el depósito de agua Pao Cachinche. La escena se identifica bajo el sistema de referencia mundial según el siguiente formato y ruta: 005, 053, respectivamente. Las series temporales de imágenes de los tres satélites Landsat agrupadas según el tipo de Satélite Landsat son: 1) L5TM (1996, 1997, 1998, 1999, 2000, 2011), 2) L7ETM (2002, 2003, 2004, 2005), 2006, 2007, 2008, 2009, 2010, 2012, 2013) y 4) L8OLI (2014, 2015 y 2016). En la mayoría de las imágenes, la variable es la reflectancia de la superficie, excepto en las imágenes correspondientes a L7ETM, solo disponible para descargar desde Landsat Collection 1 Level-1. Para su conforme utilización, en estas imágenes se aplicaron correcciones de tipo: radiométricas, atmosféricas y topográficas. Los criterios para seleccionar las imágenes de TS de Landsat son: 1) la misma temporada de cada año y 2) la cobertura más baja de: nubes, aerosoles y neblina.

Las características de la imagen adquiridas de acuerdo con cada satélite se identifican de la siguiente manera (Tabla3): a) el código de identificación de la escena, b) la fecha de adquisición, c) el tiempo del centro de la escena, d) la cobertura de la nube, e) la calidad de la imagen, f) el ángulo del azimut solar Y, el ángulo del Cenit Solar. En la Tabla 3, se observan las siguientes características de cada imagen: LT50050531996299XXX02; 1996-10-25; 14: 12: 26.1290060Z; 18.00%; 9;

124.94450537 °; y 51.52871601 °. Los parámetros de proyección de mapas según el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) son: a) Proyección: Mercator transversal universal (UTM), b) Dato: Sistema geodésico mundial 1984 (WGS84), c) Zona UTM: 19 N y e) Método de remuestreo: convolución cúbica.

En el caso de las imágenes basadas en los números digitales calibrados (Qcal), esta variable se transforma en radiancia (L_λ) y luego se convierte a la reflectancia de la atmósfera (ρ_λ). La ecuación aplicada es la siguiente (Chander, 2010):

$$\rho_\lambda = \frac{\pi \cdot L_\lambda \cdot d^2}{ESUN_\lambda \cdot \cos \theta_s}$$

Donde ρ_λ = reflectancia TOA planetaria [sin unidad], π = constante matemática igual a 3.14159 [adimensional], L_λ = radiancia espectral en la apertura del sensor [W / (m² sr μ m)], d = distancia Tierra-Sol [unidades astronómicas], $ESUN_\lambda$ = irradiancia solar exoatmosférica media [W / (m² μ m)] y θ_s = ángulo cenital solar [grados].

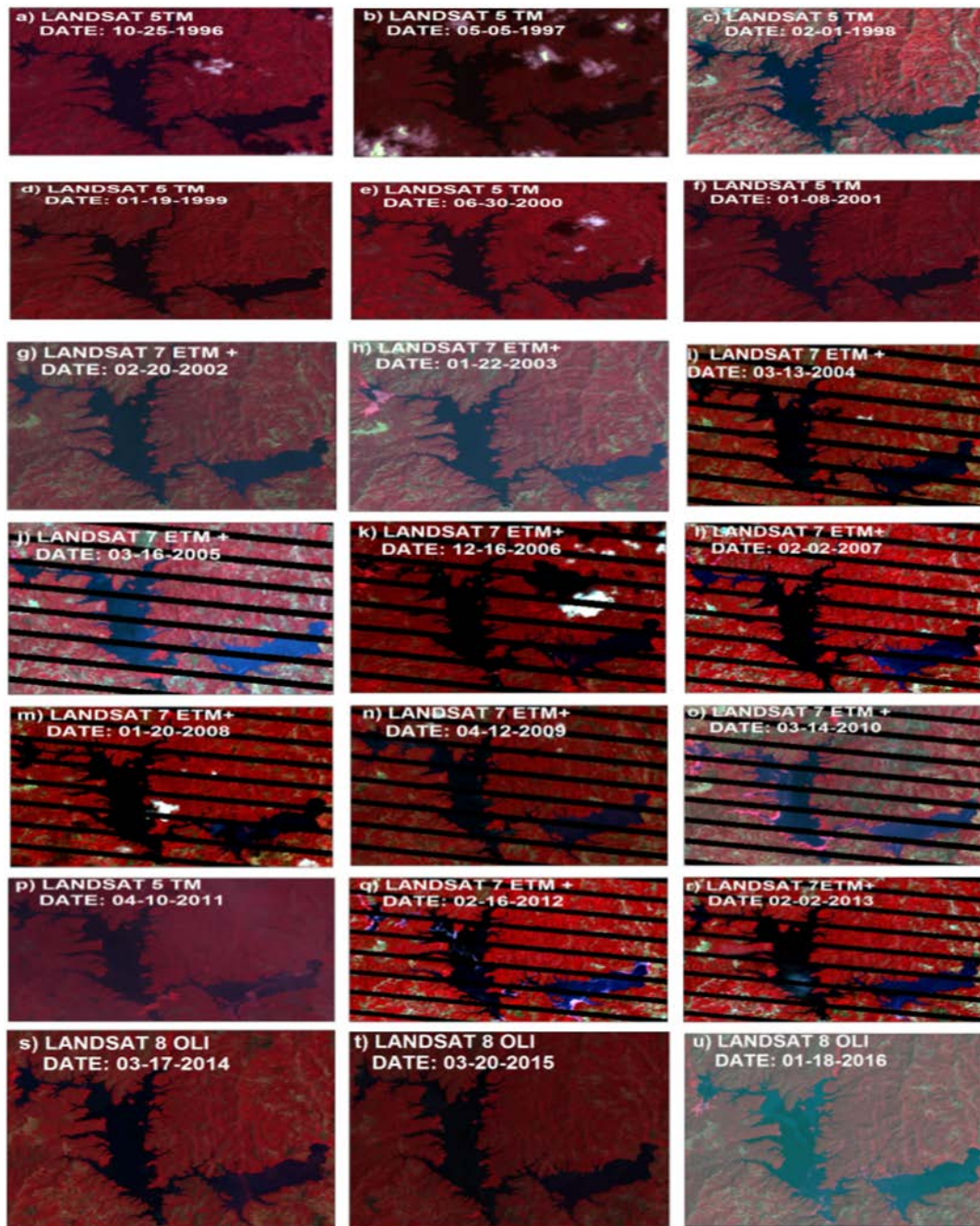


Figura 4-Imágenes del satélite Landsat procesadas y usadas para extraer la variable de reflectancia superficial desde el embalse Pao Cachinche, Venezuela

IV.3-CARACTERIZACIÓN DE LOS PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS DEL EMBALSE PAO-CACHINCHE.

Los resultados de los parámetros fisicoquímicos y biológicos medidos en el reservorio de agua de Pao Cachinche se muestran en la Figura 9, donde se observan los siguientes estadísticos descriptivos, para los parámetros estadísticos químicos de cada año:

IV.3.1-FÓSFORO TOTAL (figura 11a):

1996: Media: 0.22 mg/l, Desviación estándar: 0.25, Coeficiente de variación: 111.93%, Mínimo: 0.02 mg/l, Máximo: 0.56 mg/l.

1997: Media: 0,32 mg/l, Desviación estándar: 0,46, Coeficiente de variación: 142%, Mínimo: 0.01, Máximo: 1.01.

1998: Media: 0,32, Desviación estándar: 0,46, Coeficiente de variación: 142%, Mínimo: 0,01 mg/l, Máximo: 1,0 mg/l.

1999: Media: 0.13, Desviación estándar: 0.69, Coeficiente de variación: 53%, Mínimo: 0.07, Máximo: 0.23.

2000: Media: 0,11 mg/l, Desviación estándar: 0,06, Coeficiente de variación: 63%, Mínimo: 0,04, Máximo: 0,17.

2001: Media: 0.09 mg/l, Desviación estándar: 0.06, Coeficiente de variación: 28%, Mínimo: 0.05, Máximo: 0.1.

2002: Media: 0.065 mg/l, Desviación estándar: 0.029, Coeficiente de variación: 44%, Mínimo: 0.03, Máximo: 0.1.

2003: Media: 0.075 mg/l, Desviación estándar: 0.038, Coeficiente de variación: 51%,
Mínimo: 0.04, Máximo: 0.13.

2004: Media: 0.075 mg/l, Desviación estándar: 0.067, Coeficiente de variación: 62%,
Mínimo: 0.04, Máximo: 0.17.

2005: Media: 0.23 mg/l, Desviación estándar: 0.21, Coeficiente de variación: 90%,
Mínimo: 0.01, Máximo: 0.5.

2006: Media: 0.23 mg/l, Desviación estándar: 0.21, Coeficiente de variación: 93%,
Mínimo: 0.01, Máximo: 0.5.

2007: Media: 0,77 mg/l, Desviación estándar: 0,27, Coeficiente de variación: 35%,
Mínimo: 0,44, Máximo: 1,11.

2008: Media: 0,74 mg/l, Desviación estándar: 0,042, Coeficiente de variación: 5,6%,
Mínimo: 0,7, Máximo: 0,8.

2009: Media: 1.11 mg/l, Desviación estándar: 0.26, Coeficiente de variación:
23.21%, Mínimo: 0.87, Máximo: 1.45.

2010: Media: 0,74 mg/l, Desviación estándar: 0,26, Coeficiente de variación:
35,76%, Mínimo: 0,43, Máximo: 1,08.

2011: Media: 0,43 mg/l, Desviación estándar: 0,05, Coeficiente de variación:
13,42%, Mínimo: 0,36, Máximo: 0,5.

2012: Media: 0,57 mg/l, Desviación estándar: 0,10, Coeficiente de variación:
17,65%, Mínimo: 0,46, Máximo: 0,67.

2013: Media: 0,46 mg/l, Desviación estándar: 0,08, Coeficiente de variación:
18,71%, Mínimo: 0,36, Máximo: 0,56.

2014: Media: 0,84 mg/l, Desviación estándar: 0,08, Coeficiente de variación: 9,54%, Mínimo: 0,73, Máximo: 0,91.

2015: Media: 0.91 mg/l, Desviación estándar: 0.15, Coeficiente de variación: 16.84%, Mínimo: 0.71, Máximo: 1.07.

2016: Media: 0,84 mg/l, Desviación estándar: 0,05, Coeficiente de variación: 6,59%, Mínimo: 0,79, Máximo: 0,92. En general, en base a 84 muestras, los resultados promedios anuales son los siguientes: Media: 0.44 mg/l, Desviación estándar: 0.37, Coeficiente de variación: 83.32%, Mínimo: 0.01, Máximo: 1.45.

IV.3.2-NITRÓGENO TOTAL (figura 11b):

1996 promedio: 1.34 mg/l, Desviación estándar: 0.93, Coeficiente de variación: 69.42%, Mínimo: 0.28 mg/l, Máximo: 2.52 mg/l.

1997: Media: 1.51 mg/l, Desviación estándar: 0.86, Coeficiente de variación: 56.89%, Mínimo: 0.27, Máximo: 2.24.

1998: Media: 1.09, Desviación estándar: 0.95, Coeficiente de variación: 87.05%, Mínimo: 0.34 mg / l, Máximo: 2.48 mg/l.

1999: Media: 1.24, Desviación estándar: 0.70, Coeficiente de variación: 56.24%, Mínimo: 0.64, Máximo: 2.24.

2000: Media: 0.56 mg/l, Desviación estándar: 0.15, Coeficiente de variación: 28%, Mínimo: 0.42, Máximo: 0.78.

2001: Media: 0,48 mg/l, Desviación estándar: 0,14, Coeficiente de variación: 30%, Mínimo: 0,32, Máximo: 0,66.

2002: Promedio: 1.06 mg/l, Desviación estándar: 0.41, Coeficiente de variación: 38%, Mínimo: 0.63, Máximo: 1.54.

2003: Media: 0,85 mg/l, Desviación estándar: 0,24, Coeficiente de variación: 28,36%, Mínimo: 0,56, Máximo: 1.12.

2004: Media: 0.56 mg/l, Desviación estándar: 0.15, Coeficiente de variación: 28%, Mínimo: 0.42, Máximo: 0.78.

2005: Media: 2,45 mg/l, Desviación estándar: 1,45, Coeficiente de variación: 59%, Mínimo: 0,56, Máximo: 4,06.

2006: Promedio: 2,45 mg/l, Desviación estándar: 1,44, Coeficiente de variación: 59%, Mínimo: 0,56, Máximo: 4,06.

2007: Media: 1.88 mg/l, Desviación estándar: 1.10, Coeficiente de variación: 58.37%, Mínimo: 0.67, Máximo: 2.85.

2008: Media: 1.76 mg/l, Desviación estándar: 1.39, Coeficiente de variación: 79.39%, Mínimo: 0.19, Máximo: 3.28.

2009: Media: 2.04 mg/l, Desviación estándar: 2.11, Coeficiente de variación: 104%, Mínimo: 0.16, Máximo: 4.04.

2010: Media: 3.35 mg/l, Desviación estándar: 0.49, Coeficiente de variación: 15%, Mínimo: 2.76, Máximo: 3.95.

2011: Media: 3.15 mg/l, Desviación estándar: 0.57, Coeficiente de variación: 18.29%, Mínimo: 2.56, Máximo: 3.92.

2012: Media: 4,2 mg/l, Desviación estándar: 0,86, Coeficiente de variación: 19,65%, Mínimo: 2,99, Máximo: 4,85.

2013: Media: 3.5 mg/l, Desviación estándar: 0.78, Coeficiente de variación: 22.3%, Mínimo: 2.56, Máximo: 4.33.

2014: Media: 4.32 mg/l, Desviación estándar: 1.10, Coeficiente de variación: 25.56%, Mínimo: 2.99, Máximo: 5.69.

2015: Media: 4.62 mg/l, Desviación estándar: 0.67, Coeficiente de variación: 14.51%, Mínimo: 3.75, Máximo: 5.24.

2016: Media: 6.12 mg/l, Desviación estándar: 0.94, Coeficiente de variación: 15.38%, Mínimo: 5.36, Máximo: 7.45.

En general, según 84 muestras, los resultados promedios anuales son los siguientes: Media: 2.31 mg/l, Desviación estándar: 1.74, Coeficiente de variación: 75.52%, Mínimo: 0.16, Máximo: 7.45.

IV.3.3-PLANCTON (figura 11c)

En base a 40 muestras, los resultados promedios anuales son los siguientes: Media: 29629.2 org/ml, Desviación estándar: 13195.7, Coeficiente de variación: 44.536%, Mínimo: 13473.3, Máximo: 72609.5.

IV.3.4-DEMANDA DE OXÍGENO BIODEGRADABLE (figura 11d)

En base a 40 muestras, los resultados anuales promedio son los siguientes: Media: 9.24 mg/l, Desviación estándar: 10.46, Coeficiente de variación: 113.16%, Mínimo: 2.2, Máximo: 72.04.

IV.3.5-DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (figura 11e):

Según las 40 muestras, los resultados anuales promedios son los siguientes: Media: 40.22 mg/l, Desviación estándar: 14.01, Coeficiente de variación: 32.85%, Mínima: 10.0, Máxima: 70.94.

IV.3.6-COLIFORMES TOTALES (figura 11f)

En base a 40 muestras, los resultados promedios anuales son los siguientes: Media: 6373.75 NMP/ml, Desviación estándar: 7180, Coeficiente de variación: 112.65%, Mínima: 170 NMP/ml, Máxima: 16000 MPN / ml.

430.52 uS/cm, Desviación estándar: 64.5, Coeficiente de variación: 14.98%, Mínimo: 359.7 mg/l, Máximo: 598 mg/l.

Los resultados de los coeficientes de modelos de parámetros fisicoquímicos y biológicos medidos en el reservorio de agua se muestran en la Tabla 4.

IV.3.7 CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA (figura 11g):

En base a 40 muestras, los resultados promedios anuales son los siguientes: en base a 40 muestras, los resultados promedios anuales son los siguientes: Media: 430.52 uS / cm, Desviación estándar: 64.5, Coeficiente de variación: 14.98%, Mínimo: 359.7 mg / l, Máximo: 598 mg / l. Los resultados de los coeficientes de modelos de parámetros fisicoquímicos y biológicos medidos en el reservorio de agua de Pao Cachinche se muestran en la figura 11.

.

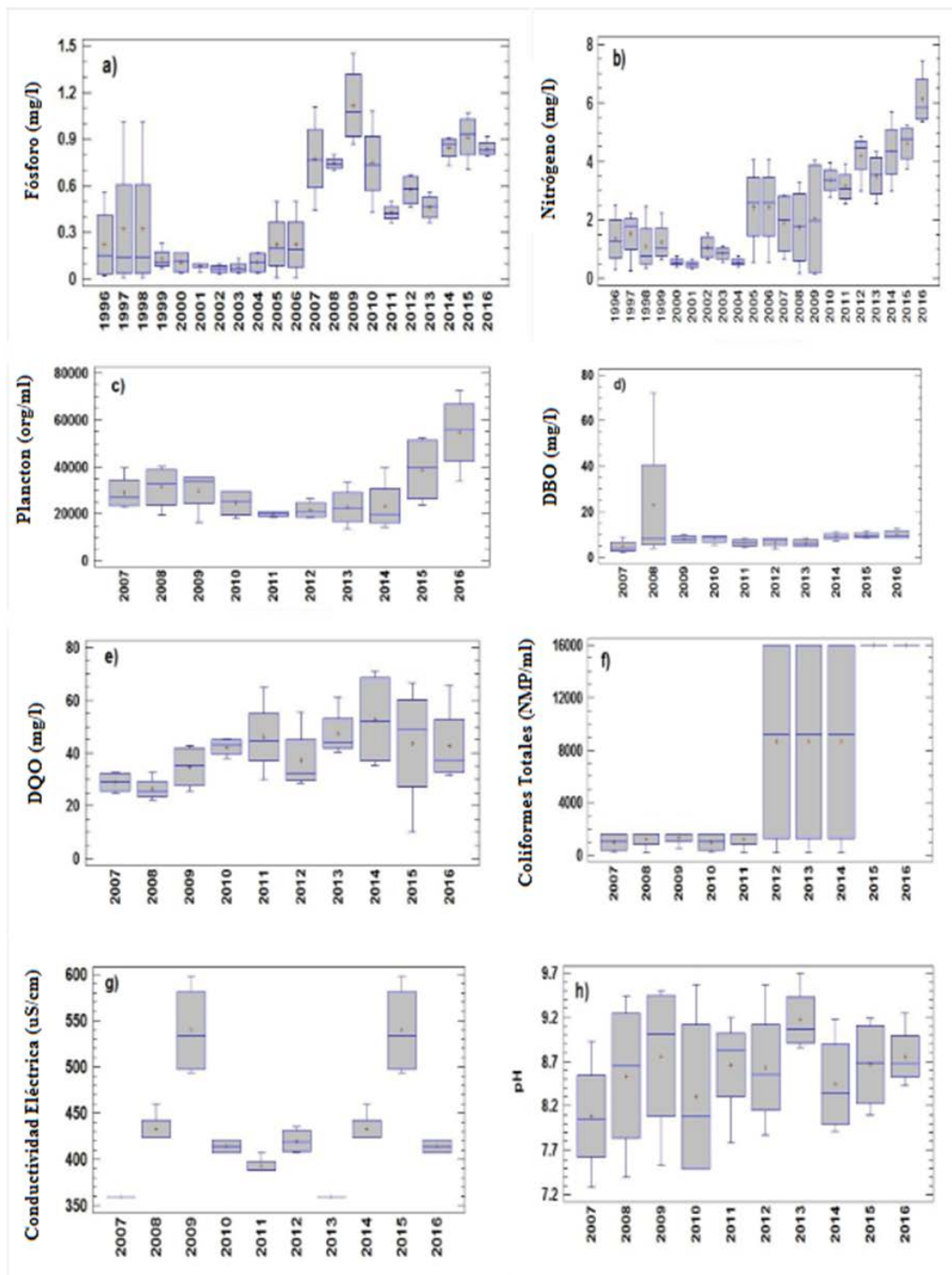


Figura 11.-Parámetros físico-químicos y biológicos medidos en el reservorio de agua Pao Cachinche, Venezuela.

IV.4 -CALIBRACIÓN DE LOS MODELOS LINEALES MIXTOS MULTIVARIABLES DE LOS PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS DEL EMBALSE PAO-CACHINCHE

Los coeficientes de los modelos están asociados a la variable de reflectancia medida por el satélite Landsat en siete bandas espectrales en las regiones visible e infrarroja. Los coeficientes promediados obtenidos de acuerdo con los parámetros fisicoquímicos y biológicos se describen a continuación:

IV.4-1- FÓSFORO TOTAL (tabla 4)

constante: 0.13, coeficiente de reflectancia en la banda espectral 1 (ρ_1): -0.08, coeficiente de reflectancia en la banda espectral 2 (ρ_2): -0.07, coeficiente de reflectancia en la banda espectral 3 (ρ_3): 0.18, coeficiente de reflectancia en la banda espectral 4 (ρ_4): 0.02, coeficiente de reflectancia en la banda espectral 5 (ρ_5): -0.03, coeficiente de reflectancia en la banda espectral 7 (ρ_7): 0.01. La ecuación basada en los coeficientes promediados se expresa de la siguiente manera:

$$\text{Fósforo total} = 0.126205 - 0.0840584 * \rho_1 - 0.0656771 * \rho_2 + 0.178178 * \rho_3 + 0.0212348 * \rho_4 - 0.0319347 * \rho_5 + 0.0139069 * \rho_7 \quad (3)$$

IV.4-2-NITRÓGENO TOTAL (tabla 4)

Constante: 1.01, coeficiente de reflectancia en la banda espectral 1 (ρ_1): 0.14, coeficiente de reflectancia en la banda espectral 2 (ρ_2): -0.44, coeficiente de reflectancia en la banda espectral 3 (ρ_3): 0.83, coeficiente de reflectancia en la banda espectral 4 (ρ_4): -0.19, coeficiente de reflectancia en la banda espectral 5 (ρ_5): 0.051,

coeficiente de reflectancia en la banda espectral 7 (ρ_7): 0.01. La ecuación basada en los coeficientes promediados se expresa de la siguiente manera:

$$\text{Nitrógeno total} = 1.0127 + 0.138257 * \rho_1 - 0.438569 * \rho_2 + 0.829679 * \rho_3 - 0.194923 * \rho_4 + 0.0506535 * \rho_5 + 0.01 * \rho_7 \quad (4).$$

IV.4-3-PLANCTON (tabla 4)

Constante: 34425.4, coeficiente de reflectancia en la banda espectral 1 (ρ_1): - 2712.72, coeficiente de reflectancia en la banda espectral 2 (ρ_2): - 304.766, coeficiente de reflectancia en la banda espectral 3 (ρ_3): 4365.72, coeficiente de reflectancia en la banda espectral 4 (ρ_4): 1201.86, coeficiente de reflectancia en la banda espectral 5 (ρ_5): - 4232.85, coeficiente de reflectancia en la banda espectral 7 (ρ_7): - 1886.89. La ecuación basada en los coeficientes promediados se indica a continuación:

$$\text{Plancton} = 34425.4 - 2712.72 * \rho_1 - 304.766 * \rho_2 + 4365.72 * \rho_3 + 1201.86 * \rho_4 - 4232.85 * \rho_5 - 1886.89 * \rho_7 \quad (5).$$

IV.4.4-DBO (tabla 4)

Constante: 5.55657, coeficiente de reflectancia en la banda espectral 1 (ρ_1): - 0.976342, coeficiente de reflectancia en la banda espectral 2 (ρ_2): 0.520194, coeficiente de reflectancia en la banda espectral 3 (ρ_3): 0.831089, coeficiente de reflectancia en la banda espectral 4 (ρ_4): - 0.951038, coeficiente de reflectancia en la banda espectral 5 (ρ_5): 0.850037, coeficiente de reflectancia en la banda espectral 7

(ρ_7): 0.341962. La ecuación basada en los coeficientes promediados se indica a continuación:

$$DBO = 5.55657 - 0.976342 * \rho_1 + 0.520194 * \rho_2 + 0.831089 * \rho_3 - 0.951038 * \rho_4 + 0.850037 * \rho_5 + 0.341962 * \rho_7 \text{ (6).}$$

5) DQO (tabla 4)

Constante: 37.2517, coeficiente de reflectancia en la banda espectral 1 (ρ_1): 3.19917, coeficiente de reflectancia en la banda espectral 2 (ρ_2): 3.265, coeficiente de reflectancia en la banda espectral 3 (ρ_3): - 4.79375, coeficiente de reflectancia en la banda espectral 4 (ρ_4): 2.47527, coeficiente de reflectancia en la banda espectral 5 (ρ_5): 2.68216, coeficiente de reflectancia en la banda espectral 7 (ρ_7): - 11.214. La ecuación basada en los coeficientes promediados se indica a continuación:

$$DQO = 37.2517 + 3.19917 * \rho_1 + 3.265 * \rho_2 - 4.79375 * \rho_3 + 2.47527 * \rho_4 + 2.68216 * \rho_5 - 11.214 * \rho_7 \text{ (7).}$$

IV.4-5-COLIFORMES TOTALES (tabla 4)

Constante: 5281.29, coeficiente de reflectancia en la banda espectral 1 (ρ_1): - 1015.24, coeficiente de reflectancia en la banda espectral 2 (ρ_2): - 1964.24, coeficiente de reflectancia en la banda espectral 3 (ρ_3): 3402.62, coeficiente de reflectancia en la banda espectral 4 (ρ_4): - 34.8813, coeficiente de reflectancia en la banda espectral 5 (ρ_5): - 307.749, coeficiente de reflectancia en la banda espectral 7

(ρ_7): 350.481. La ecuación basada en los coeficientes promediados se indica a continuación:

$$\text{Coliformes totales} = 5281.29 - 1015.24 * \rho_1 - 1964.24 * \rho_2 + 3402.62 * \rho_3 - 34.8813 * \rho_4 - 307.749 * \rho_5 - 350.481 * \rho_7 \quad (8).$$

IV.4-6-CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA (tabla 4)

Constante: 422.015, coeficiente de reflectancia en la banda espectral 1 (ρ_1): - 5.96064, coeficiente de reflectancia en la banda espectral 2 (ρ_2): - 10.4939, coeficiente de reflectancia en la banda espectral 3 (ρ_3): 15.251, coeficiente de reflectancia en la banda espectral 4 (ρ_4): - 5.57722, coeficiente de reflectancia en la banda espectral 5 (ρ_5): - 11.3074, coeficiente de reflectancia en la banda espectral 7 (ρ_7): 30.2032 . La ecuación basada en los coeficientes promediados se indica a continuación:

$$CE = 422.015 - 5.96064 * \rho_1 - 10.4939 * \rho_2 + 15.251 * \rho_3 - 5.57722 * \rho_4 - 11.3074 * \rho_5 + 30.2032 * \rho_7 \quad (9).$$

IV.4-7- pH (Tabla 4)

Constante: 8.72503, coeficiente de reflectancia en la banda espectral 1 (ρ_1): - 0.286363, coeficiente de reflectancia en la banda espectral 2 (ρ_2): 0.251979, coeficiente de reflectancia en la banda espectral 3 (ρ_3): - 0.219012, coeficiente de reflectancia en la banda espectral 4 (ρ_4): 0.146623, coeficiente de reflectancia en la banda espectral 5 (ρ_5): 0.31438, coeficiente de reflectancia en la banda espectral 7

(ρ_7): - 0.496899. La ecuación basada en los coeficientes promediados se indica a continuación:

$$pH = 8.72503 - 0.286363 * \rho_1 + 0.251979 * \rho_2 - 0.219012 * \rho_3 + 0.146623 * \rho_4 + 0.31438 * \rho_5 - 0.496899 * \rho_7 (10).$$

Tabla 4.-Coeficientes de modelos de parámetros físico-químicos y biológicos medidos en el reservorio de agua Páo Cachinche.

N°	Dependent Variable		Constant			ρ_1			ρ_2		
			Est.	LL	UL	Est.	LL	UL	Est.	LL	UL
1	Total Phosphorus	mg/l	0.13	0.04	0.21	-0.08	-0.14	-0.03	-0.07	-0.10	-0.03
2	Total Nitrogen	mg/l	1.01	0.58	1.44	0.14	-0.08	0.36	-0.44	-0.61	-0.27
3	Plancton	org/ml	34425.40	29260.20	39590.50	-2712.72	-4666.99	-758.46	-304.77	-1937.55	1328.02
4	BOD	mg/l	5.56	4.56	6.55	-0.98	-1.59	-0.36	0.52	0.06	0.98
5	COD	mg/l	37.25	32.88	41.62	3.20	1.44	4.96	3.27	1.49	5.04
6	Total, Coliformes	MPN	5281.29	2540.95	8021.62	-1015.24	-2161.56	131.08	-1964.24	-2908.25	-1020.22
7	Electrical Conductivity	uS/cm	422.02	402.73	441.30	-5.96	-12.46	0.54	-10.49	-16.98	-4.00
8	pH		8.73	8.47	8.98	-0.29	-0.40	-0.17	0.25	0.17	0.34

ρ : Reflectancia, Est: Estimación, LL: Límite inferior, UL: Límite superior

Continuación Tabla 4 Coeficientes de modelos de parámetros físico-químicos y biológicos medidos en el reservorio de agua Pao Cachinche

N°	Dependent Variable		ρ_3			ρ_4		
			Est.	LL	UL	Est.	LL	UL
1	Total Phosphorus	mg/l	0.18	0.14	0.21	0.02	-0.01	0.05
2	Total Nitrogen	mg/l	0.83	0.64	1.02	-0.19	-0.34	-0.05
3	plancton	org/ml	4365.72	1770.35	6961.09	1201.86	-856.46	3260.18
4	BOD	mg/l	0.83	0.48	1.18	-0.95	-1.32	-0.58
5	COD	mg/l	-4.79	-7.60	-1.99	2.48	0.70	4.25
6	Total Coliformes	MPN	3402.62	2170.40	4634.84	-34.88	-1168.87	1099.11
7	Electrical Conductivity	uS/cm	15.25	7.90	22.61	-5.58	-11.51	0.36
8	pH		-0.22	-0.32	-0.12	0.15	0.05	0.24

ρ : Reflectancia, Est: Estimación, LL: Límite inferior, UL: Límite superior

Continuación Tabla 4 Coeficientes de modelos de parámetros físico-químicos y biológicos medidos en el reservorio de agua Pao Cachinche

N°	Dependent Variable		ρ_5			ρ_7		
			Est.	LL	UL	Est.	LL	UL
1	Total, Phosphorus	mg/l	-0.03	-0.08	0.02	0.01	-0.05	0.08
2	Total, Nitrogen	mg/l	0.05	-0.21	0.31	0.27	-0.07	0.61
	plancton	org/ml	-4232.85	-7027.55	-1438.16	-1886.89	-6912.75	3138.96
4	BOD	mg/l	0.85	0.33	1.37	0.34	-0.48	1.16
5	COD	mg/l	2.68	0.27	5.09	-11.21	-16.32	-6.11

6	Total Coliformes	MPN	-307.75	-1807.39	1191.89	-350.48	-2866.73	2165.77
7	Electrical Conductivity	uS/cm	-11.31	-19.41	-3.20	30.20	15.83	44.58
8	pH		0.31	0.18	0.45	-0.50	-0.70	-0.29

ρ : Reflectancia, Est: Estimación, LL: Límite inferior, UL: Límite superior

IV.5-EVALUACION DEL AJUSTE ESTADÍSTICO DE LOS PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS A LA REFLECTANCIA SUPERFICIAL DEL EMBALSE PAO-CACHINCHE OBTENIDA A PARTIR DE IMÁGENES DE SATÉLITES LANDSAT.

Los parámetros estadísticos de ajuste de los modelos de parámetros físicoquímicos y biológicos medidos en el reservorio de agua de Pao Cachinche se muestran en la Tabla 5 y muestran los siguientes resultados según cada variable:

IV.5.1-FÓSFORO TOTAL (tabla 5)

Los parámetros estadísticos de ajuste para modelar el fósforo total son: R^2 : Coeficiente de determinación: 72.21%, Ajustado por R^2 : Coeficiente de determinación ajustado: 68.81%, EEE: Error estándar de estimación: 0.167, MAE: Error absoluto promedio: 0.13, DW: coeficiente de Durbin Watson: 1.44 ($P = 0.0059$) y relación F: 21.22 ($P = 0.0000$).

IV.5.2-NITRÓGENO TOTAL (tabla 5)

Los parámetros estadísticos de ajuste para modelar el nitrógeno total son: R^2 : 71.42%, R^2 ajustados: 68.19%, EEE: 0.87, EAM: 0.72, DW: 1.66 ($P = 0.0453$) y F: 22.08 ($P = 0.0000$).

IV.5.3-PLANCTON (tabla 5)

Los parámetros estadísticos de ajuste para modelar el Plancton son: R^2 : 72.43%, R^2 ajustado: 64.91%, EEE : 6450.64, EAM : 4662.93, DW : 1.84 ($P = 0.1882$) y F -ratio: 9.63 ($P = 0.0000$).

IV.5.4-DBO (tabla 5)

Los parámetros estadísticos de ajuste para modelar la DBO son: R^2 : 74.49%, R^2 ajustado: 67.21%, EEE : 1.08, EAM : 0.77, DW : 2.08 ($P = 0.4434$) y F -ratio: 10.22 ($P = 0.0000$).

IV.5.5-DQO (tabla 5)

Los parámetros estadísticos de ajuste para modelar la DQO son: R^2 : 72,05%, R^2 ajustado: 63,67%, EEE : 5,38, MAE : 3,57, DW : 2,01 ($P = 0,3552$) y F -ratio: 8,59 ($P = 0.0001$).

IV.5.6-COLIFORMES TOTALES (tabla 5)

Los parámetros estadísticos de ajuste para modelar los coliformes totales son: R^2 : 71.83%, R^2 ajustado: 66.00%, EEE : 4145.03, EAM : 2680.85, DW : 1.50 ($P = 0.0235$) y F -ratio: 12,33 ($p = 0,0000$).

IV.5.7-CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA (tabla 5)

Los parámetros estadísticos de ajuste para modelar la conductividad eléctrica son: R^2 : 70.18%, R^2 ajustado: 59.00%, EEE: 19.69, EAM 14.71, DW: 2.43 (P = 0.7070) y F-ratio: 6.28 (P = 0.0000).

75.18%, R^2 ajustado: 59.23%, EEE: 0.32, EAM 0.23, DW: 2.14 (P = 0.4888) y F: 12,63 (p = 0,0000). IV.5.8-pH (tabla 5)

Los parámetros estadísticos de ajuste para modelar los coliformes totales son: R^2 :

Tabla 5 Parámetros estadísticos de ajuste de modelos de parámetros fisicoquímicos y biológicos medidos en el reservorio de agua Pao Cachinche

Dependent Variable	R^2	R^2 adjusted	EEE	EAM	DW	F-ratio
Total, Phosphorus	72.2078	68.8047	0.163699	0.126818	1.44595	21.22
Total, Nitrógeno	71.4252	68.1903	0.876892	0.724632	1.66596	22.08
Plancton	72.4282	64.9086	6450.64	4662.93	1.83899	9.63
BOD	74.4974	67.211	1.08466	0.776614	2.0832	10.22
COD	72.0531	63.669	5.38527	3.57188	2.0152	8.59
Total, Coliformes	71.831	66.003	4145.03	2680.85	1.49723	12.33
Electrical	70.187	59.0071	19.6989	14.7123	2.43366	6.28
Conductivity						
pH	75.1871	69.232	0.318188	0.227637	2.14086	12.63

R^2 : Coeficiente de determinación, Coeficiente de determinación ajustado, VER: Error estándar de estimación, MAE: Error absoluto medio, DW: Coeficiente de Durbin Watson

IV.6-DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los parámetros fisicoquímicos y biológicos medidos en el depósito de agua de Pao Cachinche, como el fósforo total (Figura 11a), el nitrógeno total (Figura 11b),

Plancton (Figura 11c) y los coliformes totales (Figura 11f) muestran una tendencia a aumentar los valores en una magnitud estadísticamente significativa, en los dos periodos analizados. En la Figura 11, esta tendencia se puede observar debido a que los diagramas de caja no coinciden en algunos períodos. La tasa de aumento se estima como sigue para estos parámetros: 1) Fósforo total: 0.06 mg /l. año. El cambio se produjo en 2009, 2) Nitrógeno total: 0.11 mg/l. año. El cambio se produce en 2006. 3) Plancton: 2084 org/ml. año. El cambio se produce en el año 2014. 4) Los coliformes totales: 2951 NPM / ml. El cambio ocurre en 2011. El resto de las variables, como: DBO, DQO, conductividad eléctrica y pH, no varían significativamente. En general, con respecto al modelado de parámetros fisicoquímicos y biológicos, la estadística R^2 indica que los modelos que se ajustan explican entre 70.18 y 75.18% de la variabilidad en los parámetros fisicoquímicos y biológicos. El estadístico R^2 ajustado, más adecuado para comparar modelos con diferentes números de variables independientes, varía entre 59 y 69.23%. La correlación entre los parámetros fisicoquímicos estimados y observados se muestra en la Figura 4, donde se observa que los puntos están cerca de la función lineal con una pendiente de 1: 1; que es un indicador de un ajuste exitoso. La estadística de Durbin-Watson (DW), prueba para determinar los residuos indica que si existe una correlación significativa en función del orden en que aparecen en la serie temporal. Dado que el valor P asociado al coeficiente de Durbin-Watson es menor que 0.05 para las variables como: fósforo total, nitrógeno total y coliformes totales, hay una indicación de una posible correlación serial al nivel de confianza del 95.0%. El valor de P para el análisis de

varianza es menor a 0.05, existe una relación estadísticamente significativa entre las variables con un nivel de confianza del 95.0%. Al determinar si el modelo para estimar el fósforo total se puede simplificar, se observa que el valor P más alto en las variables independientes es 0.6583, que pertenece a ρ_7 . Dado que el valor P es mayor o igual a 0.05, ese término no es estadísticamente significativo al 95.0% o más alto nivel de confianza. En consecuencia, ρ_7 podría ser eliminado del modelo. Un resultado similar ocurre con el Nitrógeno Total (ρ_5), Plancton (2), DBO (ρ_7), DQO (ρ_5), Coliformes Totales (ρ_4), Conductividad Eléctrica y pH (ρ_4).

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

V.1- CONCLUSIONES

1. Se han seleccionado 21 imágenes del grupo de satélites Landsat con una frecuencia anual en el período seco de cada año durante 1996-2016 siendo accesibles en forma gratuita desde la plataforma del Servicio Geológico de los Estados Unidos
2. Según el Decreto 883, los parámetros fisicoquímicos y biológicos están por debajo del límite permisible para calidad de cuerpos de agua.
3. Se ha encontrado en cada modelo que solo se puede eliminar la banda espectral N°7 asociada a las longitudes de onda del infrarrojo de onda larga (2.08-2.35 Nm) debido a que el coeficiente asociado a las reflectancias registradas en esta banda tiene una influencia significativa baja en el resultado del modelado de parámetros fisicoquímicos y biológicos.
4. El modelado de los parámetros físico-químicos del reservorio de agua Pao Cachinche utilizando como variables independientes a las reflectancias registradas en las bandas espectrales de los satélites Landsat se ha logrado satisfactoriamente. El estadístico R^2 indica que los modelos tal como se ajustaron explican entre 70.18 y 75.18% de la variabilidad en los parámetros físico-químicos y biológicos. El estadístico R^2 ajustado, más adecuado para comparar modelos con diferentes números de variables independientes, varía entre 59 y 69.23%.

Una aplicación como esta, en combinación con los modelos matemáticos estadísticos lineales mixtos, puede proporcionar estimaciones ambientales a un costo, tanto temporal como económico mucho menor, que está en armonía con el desarrollo sostenible.

V.2 RECOMENDACIONES

1. Aplicar la metodología de estimación de parámetros fisicoquímicos a los embalses del acueducto regional del centro representados por Guataparo y Pao La Balsa.
2. Incrementar la cantidad de muestreos de parámetros fisicoquímicos en los embalses para lograr una representación de las variables desde la forma discreta a la forma continua
3. Crear estudios que incentiven el uso de los productos en imágenes satelitales desde las plataformas nacionales como el satélite Francisco de Miranda.

BIBLIOGRAFÍA

Aguirre, Gómez, R. (2015). Análisis Espectral Del Lago De Guadalupe, Mediante Imágenes De Satélite Y Datos In Situ. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM Num 86*, 15-24.

Arboleda Valencia, Jorge (2000). Teoría y Práctica De La Purificación Del Agua. Editorial M^c Graw Hill. Caracas.

Calera, B. A. (2003). Principios Físicos En la Percepción Remota. En I. d. Albacete, Teledetección y Desarrollo Rural (pág. 32). Albacete, España: Universidad Castilla La Manch.

Canada Centre For Remote Sensing. (2008). Fundamentals of Remoting Sensing. Montreal, Canadá: Canadá Centre For Remote Sensing.

Chuvienco, E. (2010). Teledetección Ambiental La observación de la Tierra desde el Espacio. Barcelona: Ariel.

Giardino, P., Ghezzi, A., & Zilioli. (2001). Detecting chlorophyll, Secchi disk depth and surface temperature in a sub-alpine lake using Landsat imagery. *The Science of the Total Environment* 268, 19-29.

Gómez, Díaz, J. L., & Dalence, J. S. (2014). Determinación Del Parámetro Sólidos Suspendidos Totales Mediante Imágenes De sensores Ópticos En Un Tramo De La

Hernández, Martínez, J., & Hernández, Téllez, M. (2013). Percepción Remota Como Herramienta Para El Monitoreo De La Calidad Del Agua. *Facultad de Ingeniería, Centro Interamericano de Recursos del Agua*, 1-6.

Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (2009). Introducción a la Percepción Remota. Bogotá, Colombia: IGAC.

Martínez, M. J., & Díaz, P. A. (2005). Percepción Remota "Fundamentos de Teledetección Espacial". México D.F: Comisión Nacional del Agua.

Rejas, Ayuga, J. G. (2008). Tratamiento Digital Previo De Las Imágenes. Madrid, España: Escuela de