# Treball de fi de màster

Títol: IMPLEMENTACIÓN DE UN MODELO DINÁMICO PARA EVALUAR LA CALIDAD DE AGUA DE LA LAGUNA ALALAY EN COCHABAMBA BOLIVIA


Cognoms: Prado Fernández

Nom: María Jean Carla

Titulació: Màster en Ciència i Tecnologia de la Sostenibilitat

Director/a: Joan de Pablo


Data de lectura


UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH
Institut Universitari de Recerca en Ciència i Tecnologies de la Sostenibilitat

Master Universitario en Ciencia y Tecnología de la Sostenibilidad

# Implementación de un Modelo Dinámico para Evaluar la Calidad de Agua de la Laguna Alalay en Cochabamba Bolivia

Fuente: Daniel James

María Jean Carla Prado Fernández
Autora

Joan De Pablo Rivas
Tutor

Agradecimientos

A Dios por ser mi fortaleza cada vez que sentía que iba a fallar.

A mi Mamá por todo el apoyo y cariño que me brinda, gracias por confiar y creer en mí, ayudándome siempre a alcanzar mis sueños.

A mi tutor guía en Bolivia Eduardo A. Morales, por guiarme y enseñarme a que todas las cosas buenas conllevan sacrificios. “Is not meant to be easy, it is meant to be right”

**Contenido**

Índice de tablas ..... 6
Implementación de un Modelo Dinámico para Evaluar la Calidad de ..... 8
Agua de la Laguna Alalay en Cochabamba Bolivia ..... 8
1. Resumen ..... 8
1.1. Castellano ..... 8
1.2. Resum ..... 9
1.3. Abstract ..... 10
2. Introducción ..... 11
3. Antecedentes ..... 12
4. Marco Teórico ..... 14
4.1. Modelos Dinámicos ..... 14
4.2. Caracterización del Área de Estudio ..... 15
4.2.1. Clima ..... 15
4.2.2. Geología ..... 15
4.2.3. Descripción del Entorno Físico ..... 15
4.2.4. Descripción del entorno Biológico ..... 16
4.3. Desbalance Ecológico: Contaminación por toxinas nocivas, cianobacterias ..... 17
4.4. Recarga de la Laguna Alalay ..... 19
4.5. Reglamentación Vigente ..... 20
5. Problemática y Contexto ..... 21
6. Objetivos ..... 21
General ..... 21
Específicos ..... 21
7. Metodología ..... 22
7.1. Modelo Dinámico de Lagos Poco Profundos: Scheffer, 1999 ..... 22
7.2. Modelo Propuesto ..... 23
7.2.1. Descripción del modelo ..... 24
7.3. Ecuaciones ..... 24
7.4. Selección de datos ..... 26
7.4.1. Subsistemas ..... 27
7.4.1.1. De la Calidad del Agua ..... 27
7.4.1.2. Subsistema Nutrientes ..... 28
7.4.1.3. Subsistema Turbidez ..... 29
7.4.1.4. Subsistema Vegetación ..... 30
7.4.2. Parámetros de comparación de datos ..... 31
7.5. Correlación de datos ..... 32

7.6. Modelación en NetLogo ..... 33
8. Desarrollo y Análisis de Resultados ..... 35
8.1. Subsistemas ..... 35
8.1.1. Subsistema de la Calidad del Agua ..... 35
8.1.2. Subsistema de Nutrientes ..... 37
8.1.3. Subsistema de Turbidez ..... 37
8.1.4. Subsistema de Vegetación ..... 38
8.2. Modelo Conceptual de la Laguna Alalay en NetLogo ..... 39
8.3. Reajuste de Variables ..... 40
8.3.1. Análisis de Componentes Principales (PCA) ..... 41
8.3.2. Nuevo Modelo Propuesto para Laguna Alalay ..... 43
8.3.3. Analogía de Condiciones Reales de la Laguna Alalay ..... 45
9. Discusión de Resultados ..... 47
10. Conclusiones y Recomendaciones ..... 48
10.1. Plan de restauración de la flora nativa ..... 48
11. Bibliografía ..... 51
12. Anexos ..... 56

**Índice de tablas**

Tabla 1. Ubicación del muestreo ..... 27
Tabla 2. Vegetación reforestada Laguna Alalay ..... 31
Tabla 3. Parámetros de comparación del modelo ..... 31
Tabla 4. Parámetros de comparación turbidez ..... 32
Tabla 5. Correlación de datos entre parámetros de cada subsistema ..... 33
Tabla 6. Reducción de los datos históricos ..... 41
Tabla 7. Especies propuestas ..... 49

**Índice de figuras**

**Figura 1.** Vista Satelital de la laguna Alalay ..... 13
**Figura 2.** Macrófitas en la laguna Alalay ..... 18
**Figura 3.** Muerte de peces en Alalay 2016 ..... 18
**Figura 4.** Recargas principales de la laguna Alalay ..... 20
**Figura 5.** Diagrama causal propuesto por Scheffer, 1999 ..... 22
**Figura 6.** Diagrama de Retroalimentación de la Laguna Alalay ..... 23
**Figura 7.** Diagrama Causal para la Laguna Alalay ..... 24
**Figura 8.** Localización de la toma de muestras ..... 26
**Figura 9.** Datos históricos de turbidez ..... 30
**Figura 10.** Diagrama del modelador de sistemas dinámicos ..... 34
**Figura 11.** Temperatura del agua ..... 35
**Figura 12.** Parámetros pH, OD, DBO, DQO ..... 36
**Figura 13.** Relación OD vs DBO5 ..... 36
**Figura 14.** Nutrientes NT y PT ..... 37
**Figura 15.** Turbidez vs PT ..... 38
**Figura 16.** Clorofila vs NT ..... 38
**Figura 17.** Diagrama del modelo causal en NetLogo ..... 39
**Figura 18**.Ejecución del modelo en NetLogo ..... 40
**Figura 19.** Correlación de datos históricos con base en el coeficiente de Pearson ..... 41
**Figura 20.** Análisis de componentes principales PCA y PCA2 ..... 42
**Figura 21.** Representación del NT, PT y turbidez ..... 43
**Figura 22.** Diagrama causal del modelo Alalay ..... 43
**Figura 23.** Diagrama del Nuevo Modelo ..... 44
**Figura 24.** Grafica del Modelo ..... 44
**Figura 25.** Clúster de puntos de muestreo; CCA de especies ..... 46

**Implementación de un Modelo Dinámico para Evaluar la Calidad de Agua de la Laguna Alalay en Cochabamba Bolivia**

# 1. Resumen

## 1.1. Castellano

Durante las últimas décadas la implementación de sistemas dinámicos con base en estudios de ecosistemas acuáticos y su relación con el entorno ha estado generando investigaciones y aplicaciones en el ámbito de la modelización, teniendo como potencial el complementar modelos verbales a sistemas complejos más abstractos. El estudio aquí presentado construye un modelo de evaluación de calidad del agua de la laguna Alalay, Cochabamba, Bolivia mediante sistemas dinámicos desarrollando un análisis de los componentes físico, químico y biológico.

La laguna Alalay es el cuerpo de agua léntico dulce más grande de la ecorregión, conocida como Valle Seco Interandino Sudamericano. A nivel paisajístico es uno de los ecosistemas urbanos más importantes debido a su extensión y biodiversidad. Entre los años 1979 a 2020 se realizaron numerosos estudios científicos con el fin de entender la limnología de la laguna.

El presente estudio incorpora el modelo planteado en 1999, para el análisis de la complejidad en ecosistemas acuáticos poco profundos y los múltiples estados alternativos que pueden ocurrir debido a las condiciones en las que se encuentre.

Con la información recopilada de datos históricos colectados *in-situ* se agruparon cuatro variables o subsistemas que fueron utilizadas para el diseño de un diagrama causal mediante el cual fue posible plantear ecuaciones que las relacionaran entre sí, para luego programar una serie de variaciones dentro de un modelo dinámico en el programa NetLogo.

El análisis del modelo muestra que la representación de un ecosistema como lo es la laguna Alalay no puede ser representado en su totalidad, debido a que cuenta con una serie de aspectos físico-químicos y tróficos complejos a nivel ecosistémico que son difíciles de plasmar a la realidad. El modelo ayuda a mostrar un amplio aspecto de los procesos existentes en cuerpos de agua, el comportamiento del modelo de turbidez a través de las variables de nutrientes se acerca a los patrones de comportamiento similares a los que se observan en condiciones naturales.

## 1.2. Resum

Durant les darreres dècades la implementació de sistemes dinàmics amb base en estudis d'ecosistemes aquàtics i la seva relació amb l'entorn ha estat generant investigacions i aplicacions en l'àmbit de la modelització, tenint com a potencial els models verbals complementaris a sistemes més abstractes. L'estudi aquí presentat construït un model d'avaluació de qualitat de l'aigua de la llacuna Alalay, Cochabamba, Bolívia mitjançant sistemes dinàmics desenvolupant un anàlisi dels components físics, químics i biològics.

La laguna Alalay és el cos d'aigua lèntic dolç més gran de l'ecorregió, conegut com Valle Seco Interandino Sudamericano. A nivell paisatgístic és un dels ecosistemes urbans més importants a causa de la seva extensió i biodiversitat. Entre els anys 1979 a 2020 es van realitzar nombrosos estudis científics amb el fi d'entendre la limnologia de la llacuna.

El present estudi incorpora el model plantat el 1999, per a l'anàlisi de la complexitat en ecosistemes aquàtics poc profunds i els múltiples estats alternatius que poden ocórrer degut a les condicions en les que es troben.

Amb la informació recopilada de dades històriques col·lectives in-situ se agruparon quatre variables o subsistemes que van ser utilitzats per al disseny d'un diagrama causal mitjançant el com va ser possible plantar ecuacions que les relacionaran entre sí, per després programar una sèrie de variacions dins d'un model dinàmic al programa NetLogo.

L'anàlisi de el model mostra que la representació d'un ecosistema com ho és la llacuna Alalay no pot ser representat en la seva totalitat, pel fet que compta amb una sèrie d'aspectes fisicoquímics i tròfics complexos a nivell ecosistèmic que són difícils de plasmar a la realitat. El model ajuda a mostrar un aspecte ampli dels processos existents en cossos d'aigua, el comportament de el model de terbolesa a través de les variables de nutrients s'acosta als patrons de comportament similars als que s'observen en condicions naturals.

## 1.3. Abstract

During the last decades, the implementation of dynamic systems based on investigations of aquatic ecosystems and their relationship with their surroundings has generated studies and applications related to statistical modeling. The intention is to complement verbal models into abstract and complex systems. The study presented here builds a model for water quality evaluation in Alalay pond, Cochabamba, Bolivia, by means dynamic systems, developing analyses of the physical, chemical and biological components.

Alalay pond is the largest freshwater lentic waterbody in the ecoregion known as South American Interandean Dry Valley. At the landscape level, the pond is one of the most important urban ecosystems due to its extension and biodiversity. Between years 1979-2020, several scientific studies were carried on the pond with the aim to understand the limnology of the pond.

The present study includes a model proposed in 1999 for the analysis of the complexity in shallow aquatic ecosystems and the multiple alternative states that can arise due to the conditions affecting the ecosystem.

Working with historical data comprising field measurements, four variables or subsystems were grouped to be used in the design of a causal diagram through which relational information could be derived. Afterwards, a series of variations within the dynamic model were programmed in NetLogo.

The analysis of the model shows that the representation of an ecosystem such as the Alalay pond can not be represented in its entirety, because it has a series of complex physico-chemical and trophic aspects at the ecosystem level that are difficult to translate into reality. The model helps to show a broad aspect of the existing processes in water bodies, the behavior of the turbidity model through the nutrient variables is close to the behavior patterns like those observed in natural conditions.

## 2. Introducción

Las lagunas son depósitos naturales de agua dulce y de menores dimensiones que el lago, sometidas a cambios climáticos y a características propias de la cuenca a la que pertenecen, la calidad de su agua varia naturalmente a lo largo del tiempo debido a factores ambientales (Real Academia Española, 2019).Sin embargo, las actividades humanas alteran a veces de manera irreversible, las características físicas, químicas y biológicas del agua (Castañe et al. , 1998; Chapman, 1996), estas actividades pueden generar una disminución en la calidad del agua que induzca a proliferación de algas dañinas, hipoxia, degradación del hábitat y cambios adversos en las redes alimenticias acuáticas (National Research Council, 2000). Debido a estas actividades antropogénicas los cursos de aguas cercanos a escenarios urbanos están siendo afectados y eutrofizados; además de restringir la disponibilidad de agua potable, la contaminación de ríos y lagos también reduce la cantidad y calidad de servicios ecosistémicos que ofrecen hábitats, reguladores climáticos, sitios de recreación, pesca, etc. (Jill y colab, 2003).

Estos recursos en su mayoría están expuestos a problemas de eutrofización; proceso natural causado por la acumulación de residuos orgánicos originado por la proliferación de ciertas algas; este cambio eventualmente causa que las lagunas desparezcan, sin embargo, el impacto humano puede acelerar este proceso (Steinitz y Kannan, 2017). La eutrofización es un proceso dinámico relacionado con la afluencia de nutrientes particularmente de fósforo (P) y nitrógeno (N) que tiene un efecto perjudicial sobre los ecosistemas acuáticos, la calidad del agua y el ciclo interno de nutrientes que desarrollan la contaminación en cuerpos de agua (Zouiten, 2012).
La contaminación en cuerpos de agua presentes en escenarios urbanos se debe a la descarga de aguas residuales sin tratamiento previo y rica en compuestos de N y P generando un crecimiento excesivo de algas, macrófitas, descargas industriales compuesta por metales pesados y compuestos orgánicos (Brahi, 2004; Camargo y Alonso, 2006; Lopez, 2003; Moss, 1998; Morales & Rivera, 2012). Estos cambios en la diversidad de especies principalmente de plancton y macrófitas altera el ecosistema natural al impedir el paso de la luz solar y disminuye el oxígeno disponible para las demás especies, lo cual favorece la floración de cianobacterias verde azules (Steinitz & Kannan, 2017).

Bolivia se encuentra entre los 19 países a nivel mundial que cuentan con reservas de agua dulce, lagunas, lagos, ríos y arroyos (FAO, 2014). La laguna Alalay es el cuerpo de agua léntico dulce más grande en la ecorregión, conocida como el Valle Seco Interandino Sudamericano, a nivel paisajístico es una de las más importantes debido a su extensión y la diversidad de aves acuáticas con la que cuenta, además de ser la laguna urbana más grande del país (Morales E. A., Rivera, Ayala, & Acosta, 2011). Sin embargo, la contaminación de aguas superficiales es un problema que ha sido objeto de estudio en los últimos años, la laguna Alalay no es ajena a esta problemática de contaminación por pertenecer a un área urbana, considerando el acelerado crecimiento de la población en los últimos años se ha generado un cambio en la calidad del agua, que a su vez causa un gran impacto en la fauna y flora típicas de la región.

Estudios previos han reportado alteraciones y un considerable deterioro del medio acuático, consecuencia de múltiples factores antrópicos pertenecientes al entorno urbano. Hoy en día a pesar de los intentos de las autoridades por realizar una gestión y un control de la contaminación no se ha llegado a un sistema de manejo que permita recuperar la laguna y la sostenibilidad como ecosistema urbano.

En este sentido, en el estado del conocimiento, la aplicación de modelos numéricos ha desempeñado un papel muy importante a la hora de entender las causas y mecanismos de contaminación y sus diferentes cambios estacionales. Mediante herramientas, la ciencia ha permitido establecer estrategias que ayuden a implementar planes de gestión y control de la contaminación. La implementación de modelos dinámicos permite comprender procesos y mecanismos elementales para distintos escenarios incorporando el espacio temporal. El presente trabajo desarrollará un modelo dinámico que muestre la interacción del ecosistema acuático en la

laguna Alalay, tomando en cuenta la dinámica del ecosistema con el fin de ver las influencias que existen en la estructura de contaminantes.

## 3. Antecedentes

Bolivia se encuentra situada en el centro occidental de América del Sur a una altura de 3500 m s.n.m., dividida en cuatro regiones geográficas; Región Andina, Subandina, Llanos Orientales y Amazonía (Montes de Oca, 2001). La ciudad de Cochabamba es la tercera ciudad más grande de Bolivia, cuenta con 1.916.000 habitantes, uno de varios valles ubicado en la ladera de los Andes perteneciente a la región Subandina, el área presenta un gran déficit hídrico con una precipitación anual promedio de 450 mm caracterizada por una vegetación de clima microforestal espinosa xerofítica (Navarro & Maldonado, 2005).

La laguna Alalay es uno de los reservorios de agua más grande de los Valles Secos Interandinos de Bolivia, ubicada en la zona metropolitana de la ciudad de Cochabamba, un ecosistema natural urbano a 2560 m s.n.m., (17° 23’ 43” S, 66° 09’ 35’’ O) (véase Figura 1). El espejo de agua cuenta con una profundidad de 0.5 a 3 m y una extensión de 2.4 ha.

En el año 1928 la laguna Alalay fue modificada según su estructura propietaria, pasando de ser terrenos privados a ser otorgadas para espacios de conformación a la Alcaldía Municipal de Cochabamba. En 1930 fue profundizada y conectada con el río Rocha mediante un canal, con la finalidad de minimizar inundaciones producidas por este río, esta construcción marco un cambio importante desde 1945 la ciudad fue aliviada de frecuentes inundaciones y a su vez se creó un servicio ecosistémico que favoreció a la biodiversidad de la región. Entre los años 1953 y 1954 la mancha urbana creció debido al implemento de la “reforma urbana”, esto afectó a la laguna siendo el comienzo de su proceso de deterioro.

El 2 de junio de 1989 por ordenanza N° 567/89 se declara a la laguna Alalay como “Área de Protección Ambiental” administrada por el Gobierno Autónomo Municipal de Cochabamba, para posteriormente el año 2004 ser promulgada por Ley N° 2867 en su artículo 1° declarada como Patrimonio Natural y Ecológico del Municipio de Cercado. Durante los años de 1989 y 1990 en época muy seca tanto la macrófitia sumergida como la densidad del fitoplancton aumentaron cambiando el espejo de agua, produciendo una turbidez alta. El año 1997 la alcaldía de la ciudad invirtió 2 millones de dólares en la recuperación de la laguna, realizando un dragado que duro hasta 1998, sin embargo, no se dio ninguna solución en temas de contaminación y degradación del medio.

La laguna Alalay actualmente continúa siendo afectada por actividades antropogénicas, los altos niveles de contaminación se han incrementado con los años y con la expansión de la mancha urbana. Entre las causas que afectan y aportan con el deterioro de la laguna se puede mencionar, la excesiva cantidad de nutrientes debido al vertido de afluentes descargados (residuos líquidos); estas son vertidas a la laguna a través de las alcantarillas; aguas residuales no tratadas, desechos de la ciudad, residuos sólidos trasladados por vientos, y una de las más importantes la inserción de macrófitas por parte de las autoridades como medida de restauración.

***Figura 1.*** *Vista Satelital de la laguna Alalay*
Fuente: Google Earth 2015

Dada la conservación de la laguna Alalay siendo una de las prioridades ambientales de la ciudad de Cochabamba, se han realizado varios estudios acerca de su dinámica ecológica y sobre alternativas para su gestión. A continuación, se realiza una recopilación de los estudios científicos más importantes realizados en la laguna Alalay

Morales & Trainor (1996), estudiaron el ecosistema acuático de la laguna Alalay analizando la comunidad fitoplanctónica y las condiciones de parámetros físico-químicos del agua, concluyendo que la laguna se encontraba en un estado eutrófico durante el periodo de julio de 1989 a junio de 1990, además de presentar concentraciones de nutrientes (nitratos, fosfatos y sulfatos) comparables a valores de la lista de lagos eutróficos según la literatura.

Cadima (1998), realizo un resumen de las características del componente vegetal acuático de la laguna Alalay entre el periodo de 1989 y 1991 y cuál es el rol dentro del metabolismo del ecosistema, como regulador de nutrientes y producto primario. Cadima determinó 65 especies de algas y 12 especies de macrófitas. Además de notar que la interacción que existía entre macrófitas y fitoplancton tenía una relación inversa entre la biomasa de las macrófitas y la densidad algal (influencia de las macrófitas sobre las micrófitas).
La relación de nutrientes de N y P fue baja durante ese periodo siendo el factor limitante el N.

Maldonado, Van Damme, & Rojas (1998), describen la contaminación del río Rocha y la conexión que existe con dos cuerpos de agua importantes en la ciudad de Cochabamba (laguna Alalay y la represa de la Angostura), proponiendo un estudio integral a través de una serie de acciones coordinadas a nivel institucional y organizacional mediante etapas, con el fin de frenar la contaminación y el intercambio de vertidos que se genera entre los tres cuerpos de agua.

Ayala et al. (2007), describe los cambios limnológicos que se suscitaron entre el año 1989 y 2006, señalando que la afección del lago se presentó debido a varios factores; el área donde se encuentra, crecimiento poblacional, alta concentración de nutrientes debido a la cantidad de aguas residuales y un mal manejo por parte de las autoridades competentes. Como parte del mal manejo realizado durante los años de 1989 y 2006 se procedió a eliminación de sedimentos, introducción accidental

de una especie de peces exóticos *Odontesthes bonariensis* (1997) y extracción anual de macrófitas flotantes (2004-2006).

Morales & Rivera (2012), realizaron un estudio que determina la idoneidad de diatomeas epifitas para evaluar la calidad de agua de la laguna y obtener un sustrato que contenga una comunidad epifítica bioindicadora, demostrando que estas comunidades se desarrollan de diferente manera según el cambio temporal y espacial; de esta toma de muestras se recolectaron 27 de las cuales se identificaron 28 taxones característicos de ambientes eutróficos y otros 17 a los que no se pudo asignar nombres de la literatura. A su vez los autores recomiendan establecer programas de monitoreo durante cualquier restauración futura del estanque.

Morales & Rivera (2013), cuestionan los estudios de macrófitas conocidas hasta entonces, describiendo que existe ausencia de datos biológicos de los cuales se conoce poco o nunca han sido reportadas en el ecosistema urbano. A su vez construyen una lista taxonómica de macrófitas estudiadas en Alalay y presentan datos de 4 plantas poco frecuentes en la laguna *Enteromorpha* sp., *Hydrocotyle ranunculoides, Rhizoclonium* sp y *Wolffia columbiana*.

Morales et al. (2017), publicaron un segundo estudio el cual fue realizado en los meses de junio a agosto de 2016 con el fin de describir la floración algal nociva de la laguna alalay que causó una muerte masiva de peces y aves en ese año, el estudio identificó tres cianobacterias reportadas como altamente tóxicas *Arthrospira fusiformis*, *Anabaenopsis milleri* y *Aphanocapsa* sp. Las cianobacterias contenían adaptaciones morfológicas, para aprovechar el alto contenido de nutrientes y una fisiología que ayudó a que estas adaptaciones determinaran su prevalencia en la laguna.

Centellas (2018), recopiló información limnológica de la laguna y la dividió en tres periodos importantes desde su creación, el primer periodo va desde el año 1939 a 1997 la ampliación de la laguna y la construcción de un trasvase que la conectó con el Rio Rocha. El segundo periodo de 1997 a 2004 donde se realizó la remoción de sedimentos desde junio de 1997 hasta principios del 2004, afectando al espejo de agua y a la cobertura vegetal de la laguna. El tercer periodo desde 2004 a la actualidad, con la proliferación de la macrófita flotante (*Pistia stratiotes*) con fines de restauración, la cual expandió hasta en un 70 % de cobertura superficial. Esta recopilación se generó con el fin de agregar a toda esta información, imágenes satelitales con la ayuda de Google Earth Engine obteniendo valores de reflectancia superficial con los cuales se generaron índices estandarizados para la vegetación.

# 4. Marco Teórico

## 4.1. Modelos Dinámicos

La modelización es notoriamente importante en el mundo biológico para interpretar y validar representaciones aproximadas a sistemas. Actualmente la modelización y la simulación se entienden a través de medios y métodos computacionales que hacen posible estudiar la complejidad que no puede ser descrita “exactamente” por la matemática tradicional (Beltrami, 1987; Ginovart, Catalina, & Blanco, 2012). La utilización de estos modelos nos permite visualizar el comportamiento de cualquier sistema, permiten comprender mejor sus procesos y mecanismos elementales para distintos escenarios y, de esta forma, reducir la incertidumbre en la toma de decisiones y aumentar, por tanto, la probabilidad de acierto en previsiones a futuro (Pita Merino, 2014).

Los modelos dinámicos a diferencia de los modelos matemáticos estáticos hacen referencia al cambio a lo largo del tiempo, algo que se modifica constantemente, esta variación puede describirse de forma causal provocada por la variación de otro recurso. Estos modelos como herramientas ayudan a analizar, describir, explicar y simular fenómenos o procesos que

involucran al medio y los aspectos sociales que lo rodean, convirtiéndose así en un mecanismo importante dentro de estudios de sostenibilidad.
La laguna Alalay al ser un cuerpo de agua léntico con problemas de eutrofización y contaminación, perteneciente al sistema urbano, ha sobrellevado una serie de cambios limnológicos que tienden a revelar inestabilidad en la comunidad de algas, ocasionan estados de turbidez alta especialmente por parte de cianobacterias "algas verdeazuladas" (cianobacterias) que aparte de dañar el ecosistema, algunas son tóxicas para otros organismos presentes en la laguna. El modelo propuesto pretende estudiar la dinámica de sistemas de lagunas poco profundas particularmente los llamados cambios de régimen de una laguna entre estados de claro a turbio utilizan modelos analíticos mínimos (Biggs et al., 2009; Scheffer, 1989,1990).

## 4.2. Caracterización del Área de Estudio

### *4.2.1. Clima*

La ciudad de Cochabamba posee un clima seco y templado, las temperaturas en invierno se encuentran entre 10 ºC con mínimas de 4 ºC y en verano no suben a más de 30 ºC (SENAMHI, 2019).Sin embargo, el clima del área de la zona de estudio tiene una particularidad, al pertenecer a la zona sur presenta una temperatura menor a la del resto de la ciudad de ahí el nombre de la laguna, la palabra *Alalay* proviene de una interjección quechua para expresar frío. La temperatura de la zona varia con 5 ºC de diferencia presentando vientos continuos, además de tener una variación marcada en el día y la noche, con una diferencia entre los valores mínimos y máximos de 10 ºC.

La cuenca hidrográfica se origina en la depresión entre las serranías de San Pedro y San Pablo lado este, y San Miguel cerro verde y Huayra Kása lado oeste (HAMC, s.f.-a, p.1). Perteneciente a valles secos interandinos de un piso bioclimático termotropical seco donde los vientos van de norte a sud por toda la cuenca, la laguna hace de regulador del clima en cuanto a precipitación, humedad y temperatura de la región (Ari, 2010).

### *4.2.2. Geología*

La geología del valle pertenece a la columna estratigráfica del ordovícico Superior terciario, se caracteriza por tener un relleno con sedimentos cuaternarios, arenosos, limosos y arcillosos. La laguna Alalay se asienta en una formación geológica post- glacial, conformada por una depresión con suelos residuales en el sector medio, compuesta por suelos coluviales y escombros de roca, además de contener estratos de arcilla en los primeros 12 m conformada por una capa impermeable que sirve como embalse, a los 50 m se encuentran depósitos de arcilla, limo, arena y grava, gran parte del área de la cordillera está cubierta por rocas del paleozoico (UMSS.GEOBOL-ORSTOM 1981 , citado por Ari, 2010, p. 29, citado por Nieto, 2014, p. 15).

### *4.2.3. Descripción del Entorno Físico*

La laguna Alalay tiene una dimensión de 2,6 km de largo por 1,5 km de ancho con una superficie de 2.4 ha, un sistema que otorga servicios culturales, ambientales y servicios reguladores que ayudan a ajustar el clima, atenuar la contaminación, conservar especies, además de ser un área de educación e investigación de gran potencial.

La principal finalidad de la laguna reside en que la cuenca hidrográfica sirva de vaso regulador en épocas lluviosas frenando las frecuentes crecidas del río Rocha, esta estrategia fue instaurada en la década de los años 30 con el fin de frenar las inundaciones que las zonas bajas de la ciudad sufrían debido al curso natural del río.

La laguna cuenta con un valor paisajístico importante, rodeado de serranías, entre las que se identifica la serranía de San Pedro, San Pablo (este), San Miguel, Cerro verde y Huayra Kasa (oeste), además sirve como espejo de agua de las serranías y compone un escenario único caracterizado por vegetación de totorales y agrupaciones de aves.

Sin embargo, al pertenecer a la zona metropolitana de la ciudad de Cochabamba y al centro de la zona sur se encuentra rodeada del entorno urbano en el cual el crecimiento poblacional se ha incrementado en los últimos años y actualmente la laguna soporta la presión urbana de casi 70 mil habitantes asentados, 19 mil viviendas, 10 mercados y aproximadamente 24 fábricas de pantalones tipo jean, además cabe puntuar que el crecimiento urbano alrededor de la laguna es de 92 habitantes por ha, esto a pesar de los esfuerzos por mantener una densidad baja en un área de 10 $km^2$ (Vargas, 2016).
Las autoridades de la ciudad en sus intentos de introducir a la laguna como parte del sistema urbano de la ciudad instauraron áreas de recreación modelando el espacio natural para obtener que los ciudadanos realicen actividades a su alrededor, es el caso del sendero que da la vuelta la laguna formada por áreas verdes y cuenta con una franja peatonal y ciclística que forma parte de la ciclovía de la ciudad, el recorrido alrededor de la laguna cuenta con aproximadamente 15 km.

Para obtener una idea detallada de cómo se encuentra formado el entorno urbano alrededor de la laguna se realizará una descripción por sectores:

La zona circúndate a la laguna Alalay se encuentra rodeada por una avenida denominada “circuito Bolivia” que conecta a la zona sur con la zona norte de la ciudad, en dirección norte se observan viviendas, negocios y mercados informales, los mismos que fueron incrementándose con los años, pasando a formar parte del sector comercial y conectando los principales mercados de la ciudad. En dirección este se encuentra el club deportivo privado (Country Club) que cuenta con una superficie de aproximadamente 1 ha abarca una extensa área e incrementa la polución del sector debido al constante ingreso de vehículos a sus instalaciones. En dirección oeste se encuentra varias fábricas de producción de plástico y pantalones que aportan a la contaminación de la laguna generando descargas de contaminantes (vertido de aguas residuales no tratadas), las autoridades locales llevan un control inadecuado en este sector. En dirección sud se puede encontrar aumento del número de viviendas y un complejo ferial donde se realizan eventos empresariales de la ciudad, estos eventos contribuyen con el incremento de residuos sólidos de la zona vertidos en repetidas ocasiones al espejo de agua, ya sea por acción del viento o por falta de un control inadecuado de las autoridades en inmediaciones de la laguna.

En los últimos 15 años el espejo de agua de la laguna se redujo en un 25 %, paso de tener 2,4 ha a 1.82 ha (Municipio de Cercado, 2015). Cabe resaltar que se cuenta con dos áreas altamente afectadas dentro el predio de la laguna, en dirección sudeste se encuentra el club deportivo de fútbol de un equipo local (Club Aurora) este cuenta con áreas verdes y varias canchas de entrenamiento y la segunda en dirección sudoeste donde existen varias canchas de entrenamiento que fueron instaladas unos años atrás, estas dos áreas no permiten el crecimiento de vegetación a su alrededor afectando el entorno y el asentamiento de aves, además de que cada año ocupan más espacio en la cuenca de la laguna (véase Figura 2).

#### *4.2.4. Descripción del entorno Biológico*

La laguna Alalay cuenta con fauna variada que va desde invertebrados hasta mamíferos, albergando a cantidad de aves, reptiles, anfibios, insectos y vegetación endémica e introducida. Hasta el momento se han registrado alrededor de ciento treinta especies de aves de las cuales cincuenta especies son nativas del lugar y el resto aves migratorias que pasan por temporadas; cinco especies de peces, dos platinchos (*Oligosarcus schindleri*) (*Astyanax lineatus*) como especie nativa, gambusia,(*Gambusi affinis*) carpa (*Cyprinus carpio*) y pejerrey (*Odontesthes bonaires*) como especie introducida; dos especies de reptiles; dos especies de anfibios y cincuenta

especies de mariposas, (Cabe mencionar que no se cuenta con publicaciones científicas oficiales, además de no contar con una guía de fauna y flora detallada de la laguna) (Opinion, 2013, 2016; Los Tiempos, 2016, 2018).

Las agrupaciones de aves componen un escenario único y son uno de los recursos más atractivos que tiene la laguna, contribuyen al valor estético y genético histórico del valle. Es importante mencionar que la biodiversidad está desapareciendo y se reduce cada vez más con el tiempo, se debe mantener la vegetación nativa del lugar y restablecer la ecología existente, además de contar con variaciones en cada ladera donde la vegetación potencial de la zona es diferente De la Barra en (2017), señala que existe salinidad proveniente de la ladera, sin embargo, la salinidad de la laguna no solo es proveniente de la ladera sino también del ingreso del río Rocha, que trae desechos líquidos del municipio de Sacaba.

En los últimos años se observó que la habilitación de campos deportivos y la actividad física cerca del espejo de agua redujo espacios a aves para su anidación, además de perder una cantidad de especies cada año debido a la contaminación que existe.

### 4.3. Desbalance Ecológico: Contaminación por toxinas nocivas, cianobacterias

La proliferación de vegetación flotante ha sido durante años uno de los mayores problemas de la laguna, presentando un estado eutrófico y contaminado debido a descargas domésticas, fábricas de plásticos y ropa, así como escorrentía de desechos orgánicos (Van Damme, y otros, 1997). Además de recibir grandes descargas de nutrientes, materia orgánica y desechos industriales de curtiembres y lavaderos de automóviles a través del río Rocha, el principal sistema lotico que atraviesa la ciudad de Cochabamba (Ayala et al.,2007; Maldonado, Van Damme, & Rojas, 1998; citado en Morales et al.,2011, p3). Estudios recientes señalan que las descargas de agua hacia la laguna contienen trazas de metales pesados, principalmente de cobre, cromo, mercurio, plomo y zinc (Pérez, 2005 citado en Morales et al.,2011, p3).

Con los años la contaminación ha ido aumentando, marcado por tres escenarios importantes. El primero con la introducción de la macrófitas flotantes (*Pistia stratiotes*) la cual fue utilizada como herramienta de restauración con el fin de disminuir la carga de nutrientes asociada a la columna de agua, llevando a una proliferación masiva. La segunda en 2004 y 2005 con la extracción de 236 toneladas de macrófitas (*Pistia stratiotes*) y 5090 durante varios meses de trabajo. La tercera en 2015 con la reducción de esta especie hasta su desaparición.

***Figura 2.*** *Macrófitas en la laguna Alalay*
Fuente: Los Tiempos, 2018

El 11 de marzo de 2016 se registró la muerte de miles de peces y aves en la laguna, este desbalance ecológico fue provocado por elevados niveles de N y P, además de una sobre población de algas y aumento de dióxido de carbono que provoco bajos niveles de oxígeno (véase Figura 3). En un estudio realizado ese mismo año el Morales (2017) señalo que la muerte masiva de peces y algunas aves se debía a un alga filamentosa (*Arthrospira fusiformis*, *Anabaenopsis milleri* y *Aphanocapsa* sp.) proveniente de cianobacterias las cuales aparecen en condiciones con pH elevados (9-12), altas concentraciones de sales, radiación solar y nutrientes como P y N en exceso (Morales et al., 2017).

***Figura 3.*** *Muerte de peces en Alalay 2016*
Fuente: Los tiempos, 2016

A raíz de la fuerte contaminación de la laguna se realizaron numerosos estudios, investigaciones y tomas de muestras del área que hasta la fecha no han dejado de ser monitoreadas. El actual monitoreo se encuentra a cargo del Centro de Aguas y Saneamiento Ambiental (CASA) perteneciente al laboratorio de la Facultad de Ciencias y Tecnología de la Universidad Mayor de San Simón (UMSS).

### 4.4. Recarga de la Laguna Alalay

La recarga de la laguna Alalay se realiza a través de dos maneras y mediante dos cuerpos de agua importantes en la ciudad de Cochabamba, el primer ingreso se encuentra conectado con el río Rocha (principal rio que cruza la ciudad) y el segundo por la represa de la Angostura (embalse localizado al sur de la laguna) (véase Figura 4). Sin embargo, existen varios ingresos indirectos que también inciden en los procesos de deterioro de la laguna.

La principal recarga se realiza a través del río Rocha que ingresa por el lado noreste, en época de lluvias se llena de agua y cierta cantidad de la misma pasa a la laguna a través de un canal regulado, el agua del río contiene una excesiva carga de nutrientes que se trata de controlar mediante un sedimentador en el ingreso del canal, esto con el fin de retener nutrientes antes de su ingreso a la laguna. Es importante mencionar que a pesar de esta medida esto no se cumple y las aguas que ingresan por esa zona son altamente contaminadas.
La segunda recarga ingresa por la zona este a través de un canal regulado que conecta con la represa de la Angostura, cuando ambos se llenan o incrementan su caudal de agua es compartida mediante dos embalses y otros canales conectados aumentando así el nivel de agua de la laguna. La mayor parte del agua de la represa de la Angostura es utilizada en regadíos de la zona por lo que los ingresos de agua hacia la laguna contienen sedimentos, estos ingresos en la entrada forman una especie de río que ingresa y sale por la zona noreste juntándose con aguas de alcantarillas para luego volver a ingresar a la laguna.

Según (Ari, 2010), el principal aporte de nutrientes que se tiene en la laguna Alalay es a través de escorrentías con un total de 47%, los aportes del río Rocha son de un 38% y un 15 % proveniente de la represa de la Angostura, aguas residuales y lluvia directa sobre el espejo de agua.

En cuanto a los ingresos de forma indirecta a la laguna debido a escorrentías, si bien no cuentan con una cantidad significativa de agua, afectan a la laguna por el contenido de nutrientes y químicos que contienen. Como se ha mencionado anteriormente en el acápite 4.2.3. el entorno alrededor de la laguna Alalay se ve afectado por el crecimiento urbano con actividades deportivas, comerciales e industriales. La zona noreste se encuentra afectada debido a la utilización de químicos para la mantención de campos de deportivos en el Country Club, estos percolan en el suelo para luego terminar en forma de escorrentía en la laguna. Este mismo problema sucede con las canchas de futbol de equipos locales dentro del predio, el uso de sulfatos y nitratos para la mantención de sus canchas, sin embargo, esta última incidencia se da de forma directa en la laguna. La zona sudeste se ve afectada por los campos de golf de la municipalidad también por escorrentía de sustancias químicas utilizadas para su mantención. La zona sudoeste es afectada por desechos de fábricas de ropa, que descargan sus aguas a alcantarillas clandestinas. Por último, la zona sud se ve afectada por casas aledañas y por el centro ferial que, en algunas épocas del año, los desagües se saturan causando un aumento del caudal y vertiendo gran parte de sus aguas a la laguna a través de escorrentías.

Estos canales pluviales y aguas servidas deben ser desviados y reparados con el fin de que solo ingrese la cantidad y la calidad de agua adecuada reduciendo la carga contaminante.

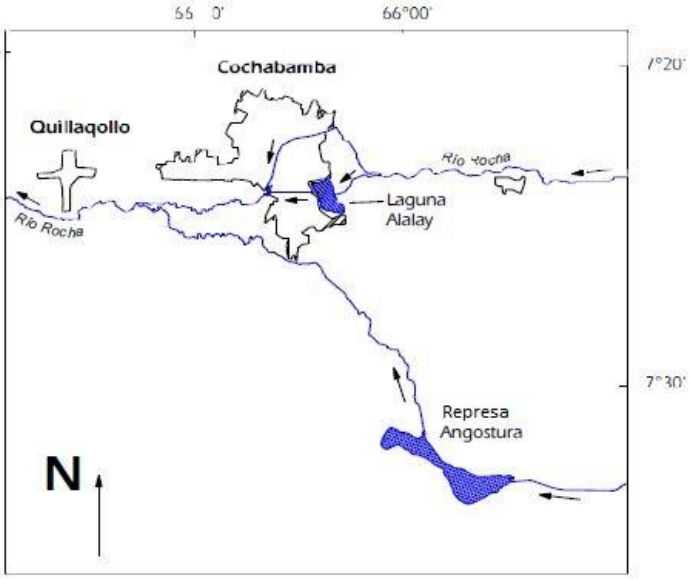


**Figura 4.** Recargas principales de la laguna Alalay
Fuente: Maldonado et al, 1998

### 4.5. Reglamentación Vigente

Dentro de los aspectos legales y reglamentos para la protección de la laguna Alalay y su conservación se formularon tres leyes significativas, Ley 2867 de 2004, Ley 3745 de 2007 y la Ley general 1333 de Medio Ambiente. La primera se decreta como prioridad regional para su protección y conservación, la segunda para llevar a cabo una recuperación y mejoramiento del entorno natural y la tercera que norma y regula la conservación del medio ambiente (Los Tiempos, 2016).

La Ley N.º 2867 de 2004 en su artículo 1 declara prioridad regional, la protección y conservación de la laguna Alalay, como Patrimonio Natural y Ecológico del Municipio de Cercado. Articulo 2 dejando encargadas a la Prefectura del Departamento de Cochabamba, el Gobierno Municipal de Cercado, las Universidades de San Simón y Católica para la realización de estudios futuros (véase Anexo 1).

La Ley N.º 3745 de 2007, presentó como objeto generar un marco jurídico para la toma de acciones de las instituciones involucradas en el marco medio ambiental con el fin de desarrollar una serie de responsabilidades en cuanto recuperación, mejora y preservación de la laguna Alalay, asignando un plan inmediato y a largo plazo (véase Anexo 2).

La Ley 1333 general del medio ambiente tiene como objeto la protección y conservación del medio ambiente y los recursos naturales, es el regulador de acciones del hombre con relación a la naturaleza, promueve el desarrollo sostenible con la finalidad de mejorar la calidad de vida de la población (Ley 1333, 1992).

## 5. Problemática y Contexto

La laguna Alalay es un ecosistema acuático que ha presentado problemas de diferente índole, como la zonificación, urbanización, crecimiento poblacional, contaminación, eutrofización e inserción de especies no nativas llegando a empeorar la situación en los últimos años. Sin embargo, a pesar de los numerosos estudios realizados, no se cuenta con ninguna estrategia de gestión en cuanto al manejo de la laguna, es importante mencionar que, a pesar de los intentos del municipio por recuperar el espejo de agua se tomaron medidas con resultados temporales que no llevaron a mejoras significativas.

El siguiente trabajo pretende estudiar la dinámica de sistemas de la laguna Alalay, utilizando datos históricos de parámetros físico-químicos con el fin de comprender el comportamiento que se tiene en la columna de agua.

## 6. Objetivos

### General

Crear un modelo dinámico simplificado del ecosistema de la laguna Alalay, que; involucre variables de calidad del agua, nutrientes, turbidez y vegetación, con el fin de ver la dinámica de esas variables asociadas a la columna de agua.

### Específicos

- Evaluar el modelo del ecosistema acuático del lago identificando las variables que más influyen en la estructura de la columna de agua en la laguna Alalay.
- Identificar datos representativos sobre el comportamiento que tienen los parámetros físico-químicos.
- Identificar los picos de los parámetros más sobresalientes del modelo y analizarlos para proyectar un escenario acorde a la realidad de la laguna Alalay.
- Proponer un plan de restauración de la flora nativa dentro del cuerpo de agua con el fin de obtener una mejora en la estructura de la calidad de agua en la laguna Alalay.

## 7. Metodología

La metodología utilizada para el estudio plantea la dinámica de sistemas involucrada en la contaminación de lagunas poco profundas y a la relación que existe entre sus componentes, obteniendo un modelo expresado con ecuaciones algebraicas simples que contenga variables particulares y parámetros característicos que influyen temporalmente en la evolución de contaminantes de la laguna Alalay.

El modelo buscará determinar factores que puedan ser representativos en su comportamiento con el fin de identificar particularidades como patrones, umbrales, puntos de inflexión y equilibrio, y otras dinámicas como similitudes, conductas temporales y de escala (Bohorquez et al., 2009).

### 7.1. Modelo Dinámico de Lagos Poco Profundos: Scheffer, 1999

El método propuesto por Marten Scheffer (1999), en el artículo "Searching Explanations of Nature in the Mirror World of Math", publicado en la revista Ecology and Society" es uno de los artículos más significativos en el estudio de sistemas complejos y su adaptabilidad. Scheffer estudio la complejidad en ecosistemas acuáticos con una mira hacia lagos poco profundos que puedan tener múltiples estados estables y amplió el estudio de la red alimentaria con el fin de comprender la inestabilidad en la comunidad de algas.

El modelo propuesto por Scheffer se encuentra representado en tres supuestos:(1) La turbidez aumenta con el nivel de nutrientes; (2) la vegetación reduce la turbidez; y (3) la vegetación desaparece cuando se excede una turbidez critica. La figura 5 presenta los mecanismos evaluados y las interacciones que existen a través de todas las rutas representadas por la turbidez y la vegetación mediante distintos mecanismos, propone retroalimentaciones que pueden dar lugar a dos estados estables alternativos: uno donde la abundancia de vegetación sumergida ayude a reducir la situación eutrófica y por tanto el estado de turbidez mejore y la segunda un estado turbio donde las plantas no pueden colonizar.
Esta reducción eutrófica implica la reducción de la suspensión del sedimento, aumento de las posibilidades de refugio para el zooplancton (consumidor de microalgas), reducción de la concentración de nutrientes disponibles para el crecimiento del fitoplancton y producción de sustancias alelopáticas que pueden ser tóxicas para las microalgas.

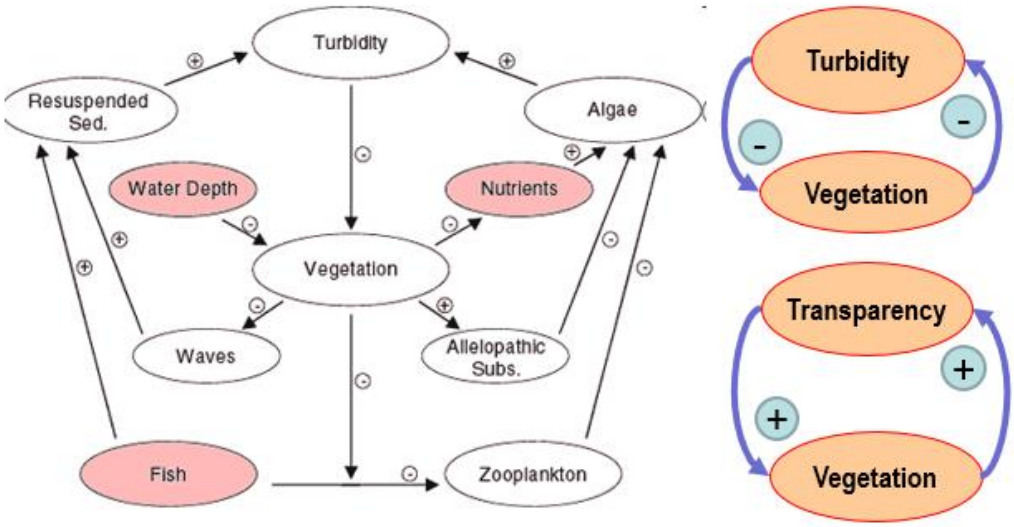


***Figura 5.*** *Diagrama causal propuesto por Scheffer, 1999*
Fuente: Sheffer,1999

Sin embargo, debemos tomar en cuenta que la dinámica de lagos y lagunas no es tan sencilla, muchas veces estas condiciones en lagunas poco profundas pueden mostrar estados dramáticos de contaminación y colapsar por exceso de nutrientes u obtener un estado estable donde la vegetación ayude a las condiciones y limite un rango intermedio de nutrientes.

### 7.2. Modelo Propuesto

En primer lugar, se debe aclarar que el modelo propuesto se realiza para una laguna y no así para un lago, si bien la dinámica en lagunas poco profundas es más compleja, debemos tomar en cuenta que ambas son depresiones en la superficie terrestre que contienen aguas estancadas drenadas en muchos casos por ríos, en este caso en específico por el río Rocha y la represa de la Angostura.
La propuesta anteriormente mencionada no es ajena a nuestro caso, la laguna Alalay es un ecosistema poco profundo con un fuerte problema de eutrofización donde existe un exceso de nutrientes que ocasionan *bloom* de cianobacterias generando turbidez en la superficie, este problema forma parte de alrededor de más de medio siglo ocasionando efectos tóxicos en peces, aves e incluso personas que viven en la zona. Los lagos poco profundos son difíciles de restaurar, incluso si la carga de nutrientes se reduce a valores por debajo de aquellos en los que se produjo el colapso del estado claro y vegetado, los lagos poco profundos tienden a permanecer en un estado altamente turbio (Scheffer, 1999). El nuevo modelo se realiza con base en las interacciones existentes en la laguna Alalay, exceso de nutrientes, turbidez, calidad del agua utilizando datos limnológicos históricos de la laguna.

Este trabajo no pretende dar una solución a la contaminación de la laguna Alalay, sin embargo, mediante la dinámica de sistemas lo que se pretende es analizar los comportamientos del ecosistema acuático asociado a los parámetros establecidos. Si bien el modelo está basado en el estudio de Scheffer cuenta con modificaciones, esta mención se realizó con el fin de estudiar un modelo que se asemeje a la dinámica que existe en cuerpos de agua poco profundos relacionados con la turbidez.

El modelo dinámico está compuesto por 4 subsistemas a trabajar: calidad del agua (CA), nutrientes (N), turbidez (T) y vegetación (E).

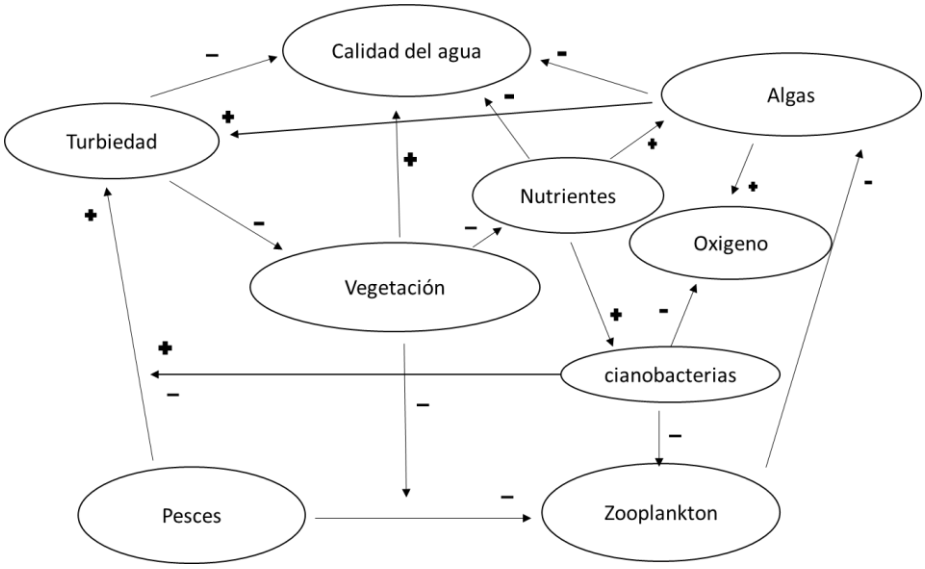


***Figura 6.*** *Diagrama de Retroalimentación de la Laguna Alalay*
Fuente: Elaboración propia en base a Scheffer,1999

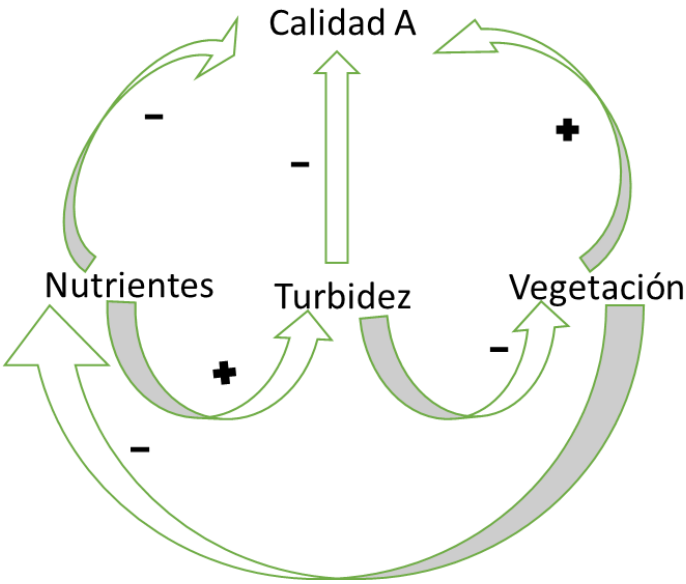


***Figura 7.*** *Diagrama Causal para la Laguna Alalay*
Fuente: Elaboración propia

Un diagrama "causal" es un diagrama que muestra relaciones de causa y efecto entre elementos múltiples y corresponden a retroalimentaciones negativas y positivas (Pita Merino, 2014), a través de bucles de retroactividad que muestran los cambios iniciados por sí mismos y quienes los afectan (Liu, et al., 2007).

La figura 7 muestra la dinámica de las entradas (*inputs*) y salidas (*outputs*) y sus respectivas retroalimentaciones (*feedbacks*).

### *7.2.1. Descripción del modelo*

El modelo propuesto como tal utiliza la calidad del agua (CA) como variable descriptora fundamental del medio, en caso de que exista un equilibrio en el cuerpo de agua, hará que las cargas sean positivas en cuanto a nutrientes (N) y turbidez (T); en el caso de una mala calidad de agua se dará un crecimiento excesivo de nutrientes y una turbidez elevada; el comportamiento del modelo que está sujeto al espacio tiempo, ayudará a mostrar el comportamiento que tienen los componentes del sistema.

## 7.3. Ecuaciones

Los modelos dinámicos en lagunas poco profundas están siendo estudiados con mayor frecuencia durante la última década, demostrando que la dinámica esencial del proceso de eutrofización puede modelarse mediante ecuaciones.

Una de las maneras más utilizadas para modelar sistemas dinámicos es mediante ecuaciones diferenciales, una ecuación diferencial es un tipo de sistema dinámico basado en una ecuación matemática la cual relaciona funciones de una o más variables con sus derivadas (Rosas, 2019).

En el caso de los cambios catastróficos que se dan en el ecosistema de un cuerpo de agua y otros se cuenta con una ecuación básica de modelo matemático simple basado en ecuaciones diferenciales (Rosas, 2019)

$$\frac{dx}{dt} = f(x)$$

Para este modelo se tomarán en cuenta 4 subsistemas (variables), subsistema de calidad del agua (CA), turbidez (T), nutrientes (Nu) y vegetación (V), obteniéndose una ecuación para cada variable, con base en el diagrama causal de la figura 7.

- *Calidad de Agua (CA)*

La calidad de agua es uno de los subsistemas que está definido por datos limnológicos de la laguna, cuenta con varios parámetros de medición. Los parámetros que se toman en cuenta para este subsistema son temperatura, pH, oxígeno disuelto (OD), demanda biológica de oxígeno (DBO) y demanda química de oxígeno (DQO).

La calidad del agua tiene una retroalimentación positiva $C_1$ por parte de la V; $C_2$ es la retroalimentación negativa por parte de la turbidez y $C_3$ es la retroalimentación negativa que entra de los nutrientes (Nu).

$$\frac{dCA}{dt} = C_1 * v - (C_2 * \ T + C_3 * Nu) \tag{1}$$

- *Turbidez (T)*

La turbidez está regulada por los nutrientes, $C_4$ corresponde a la retroalimentación positiva que tiene con los Nu, donde a una mayor cantidad de Nu mayor turbidez.

$$\frac{dT}{dt} = C_4 * Nu \tag{2}$$

- *Nutrientes (Nu)*

Al subsistema de nutrientes entra una retroalimentación negativa que es $C_5$ que a mayor vegetación habrá una reducción de Nu.

$$\frac{dN}{dt} = \ v * (1 - C_5) \tag{3}$$

- *Vegetación (V)*

El subsistema de vegetación cuenta con un bucle negativo que entra de la turbidez $C_6$

$$\frac{dV}{dt} = -C_6 * T \tag{4}$$

### 7.4. Selección de datos

La selección de datos recolectada para el modelo corresponde a datos limnológicos históricos de la laguna Alalay colectados en tres zonas representativas, esta zonificación se realizó con base en la diferencial de la laguna desde la cuenca y de la calidad de agua existente (véase Figura 8). La selección de datos es una recopilación de información científica e informes de monitoreo generados por las autoridades de la ciudad de Cochabamba y centros de investigación de universidades. Con base en la información obtenida se generó una base datos con información limnológica de la laguna desde el año 1989 a 2017 (cabe resaltar que la información obtenida no es continua, existen años que no cuentan con datos).

La colección de datos históricos se realizó con base en datos proporcionados por dos laboratorios. El Herbario Criptogámico de la Universidad Católica Boliviana "San Pablo" (HCUCB) del cual se registran datos desde el año 2011 a 2014 y el Centro de Aguas y Saneamiento Ambiental (CASA), el cual realiza un seguimiento continuo de la contaminación de la laguna Alalay, desde el año 2003 a 2017, además de contar con una serie de datos de la Unidad de Limnología y Recursos Acuáticos de Universidad Mayor de San Simón (ULRA-UMSS), que posee datos para años previos.

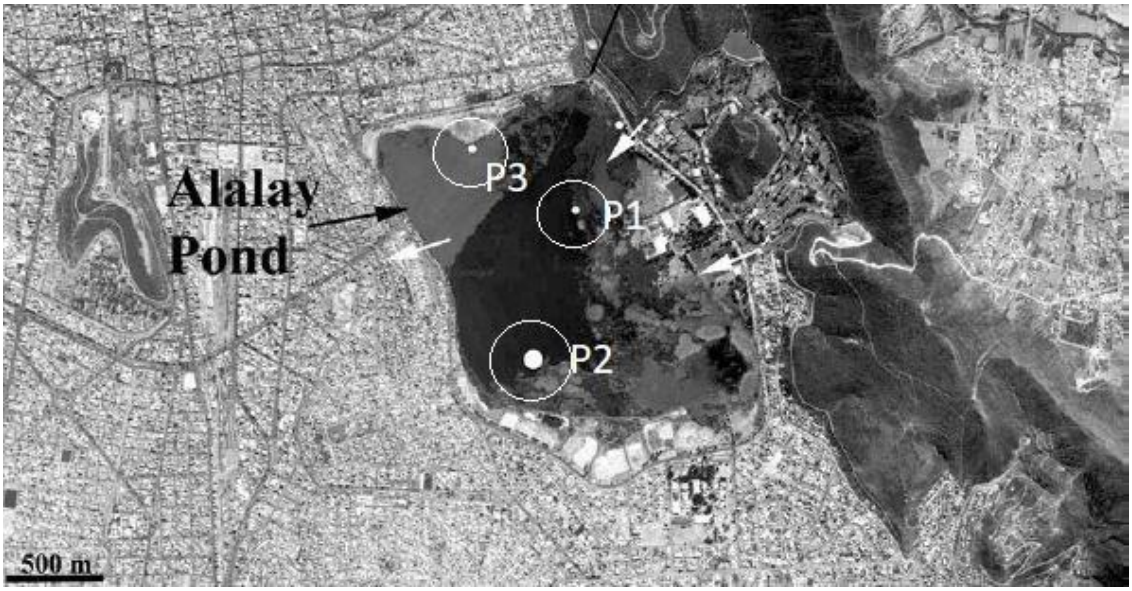


***Figura 8.*** *Localización de la toma de muestras*
Fuente: Morales et al., 2017

La ubicación para la toma de muestras es representativa de zonas donde existe una mayor variación, la eutrofización del cuerpo de agua no es uniforme en toda la laguna. Estas tres zonas muestran datos representativos de los diferentes puntos de muestreo, esto se debe a que existe diferentes ingresos de recarga a la laguna, de manera que las zonas reciben diferentes cargas contaminantes.

Los puntos de muestreo no se ampliaron, debido a que las muestras tomadas en otras áreas tenían las mismas características en mediciones de parámetros físico-químicos por su proximidad. El análisis de un número mayor de puntos tampoco era justificable monetariamente, debido a los costos elevados de procesamiento de muestras. La ubicación y las coordenadas de los puntos de muestreo se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. *Ubicación del muestreo*

| | Ubicación | Coordenadas |
|---|---|---|
| **P1** | Noreste | 17º24'05.2" S-66º08'13.7" W |
| **P2** | Sudeste | 17º24'49.4" S-66º8'25.2" W |
| **P3** | Noroeste | 17º24'20.4" S-66º8'39.5" W |

Fuente: Elaboración propia con base en Morales, 2017.

### *7.4.1. Subsistemas*

#### *7.4.1.1. De la Calidad del Agua*

La calidad del agua es el conjunto de características de parámetros físico-químicos y microbiológicas, su valoración se da por el proceso de evaluación del medio físico químico y biológico del agua con relación en actividades humanas y alteración de vida acuática (Chapman, 1996). Para la variable de calidad del agua en este estudio se modelarán datos únicamente de parámetros físico-químicos, esto debido a la complejidad del medio que tienen los cuerpos de agua y la disponibilidad de calidad de datos existente de fuentes confiables.

Los parámetros físico-químicos que se utiliza para evaluar la calidad del agua son indicadores de impacto ambiental en cuerpos de agua, parámetros como temperatura, OD, pH entre otros, representarán la evolución de calidad de agua en el modelo. Los datos fueron muestreados de los tres puntos anteriormente mencionados (véase figura 8), realizando un seguimiento exhaustivo.

##### *7.4.1.1.1. Temperatura*

La temperatura al ser uno de los factores ambientales más importantes que influyen en la proliferación y supervivencia de los microorganismos es un parámetro que se debe tomar en cuenta como dato de calidad de agua. La temperatura del agua de la laguna Alalay se ve influenciada por la zona en la que se encuentra, como se había mencionado en el apartado 4.2.1 la zona presenta una temperatura menor a la del resto de la ciudad con una diferencia de 5 ºC y caracterizada por fuertes vientos, se debe tomar en cuenta que en verano los niveles de temperatura son elevados e influyen en la proliferación de bacterias usando grandes cantidades de OD.

##### *7.4.1.1.2. pH*

El pH es el valor que determina si el agua es ácida, neutra o básica, en una escala de 0 a 14, si el pH tiene un valor de 7 la muestra es neutra, valores por debajo de 7 expresan acidez, mientras que valores por encima de 7 muestran un estado básico. El nivel de pH se puede determinar con varios métodos de análisis, como por ejemplo los indicadores de color, utilizando pH papel o pH-metro. El método que se utilizó para determinar el nivel de pH en la laguna fue pH metro para los tres puntos de muestreo. La laguna cuenta con mediciones por encima de 7 llegando a niveles de 10 lo que muestra una fuerte actividad biológica.

#### *7.4.1.1.3. Oxígeno Disuelto (OD)*

El OD es la cantidad de oxígeno gaseoso que esta disuelto en el agua, fundamental para la vida de peces, plantas, algas y otros organismos, además de considerarse un indicador de la capacidad que tiene un cuerpo de agua para mantener la vida acuática (UCM, 2015).

En el caso de la laguna Alalay se cuenta con bajos niveles de oxígeno debido al crecimiento excesivo de algas y su acumulación, las algas son descompuestas por la intervención de organismos aerobios agotando el oxígeno.

#### *7.4.1.1.4. Demanda Biológica de Oxígeno (DBO)*

La DBO es uno de los parámetros de mayor importancia en el estudio y caracterización de aguas no potables en general, indica la presencia y biodegradabilidad de la materia orgánica presente en cuerpos de agua. Estima la cantidad de oxígeno necesaria para estabilizar el carbono orgánico y la rapidez con el que este material es metabolizado por bacterias descomponedoras (OSE, 2007, p1).

En el caso de la laguna Alalay al ser caracterizada como un cuerpo de agua léntico eutrofizado y con un alto contenido de nutrientes lo cual facilita a la proliferación de algas. Según Scheffer (1985), las algas son descompuestas por bacterias en procesos aeróbicos que consumen el oxígeno y al terminarse el oxígeno estos residuos orgánicos son depositados en el fondo de la laguna sufriendo procesos anaeróbicos que desprenden sulfuro de hidrógeno ($H_2S$) y otros gases que causan olores nauseabundos en cuerpos de agua, produciendo un caso de eutrofización extrema.

#### *7.4.1.1.5. Demanda Química de Oxígeno (DQO)*

La DQO mide la materia orgánica e inorgánica en el agua, es un parámetro que mide la cantidad de sustancias químicas que hay disueltas o en suspensión en una muestra líquida. Es utilizada para medir el grado de contaminación en ríos, lagos o acuíferos que puedan contener una cantidad apreciable de materia orgánica. Se debe tomar en cuenta que se tienen muy pocas mediciones de DQO.

### *7.4.1.2. Subsistema Nutrientes*

El nivel de eutrofización en cuerpos de agua se encuentra ligado al exceso de nutrientes. En el caso de Alalay este exceso de nutrientes proviene de fuentes externas como la recarga de aguas que se tiene para mantener el espejo de agua (río Rocha y represa de la Angostura), además de contar con escorrentías de fuentes antrópicas.
El exceso de nutrientes es un proceso provocado principalmente por N y P, los cuales mayormente proviene de actividades del hombre como por ejemplo uso de fertilizantes, residuos urbanos y actividades industriales entre otros. Estos dos parámetros serán analizados dentro del subsistema de nutrientes en el modelo.

#### *7.4.1.2.1. Nitrógeno (N)*

El nivel de N en cuerpos de agua es considerado uno de los nutrientes que afecta a la productividad primaria de los ecosistemas acuáticos, además de ser un elemento limitante para el crecimiento

de fitoplancton ocasionando un aumento de la biomasa algal. En la laguna Alalay se tomaron datos de NT para los tres puntos de muestreo, se debe tomar en cuenta que el N con el que se cuenta en la laguna está limitado por P.

#### *7.4.1.2.2. Fósforo (P)*

Los compuestos del P conducen al crecimiento de las algas, además de ser un componente esencial para el crecimiento de los organismos en cuerpos de agua. Para el análisis de P en la laguna Alalay se midió la concentración de PT la cual mide la cantidad de P disponible en forma orgánica e inorgánica, disuelta y particulada en los sistemas acuáticos ( (MVOTMA, 2016).

### *7.4.1.3. Subsistema Turbidez*

Los sistemas eutrofizados tienden a tener una alta productividad a cierta profundidad, la misma que disminuye cuando existe una reducción de luz a esto se le llama diminución de la zona fótica y se debe a la concentración de algas y macrófitas provocada por exceso de nutrientes, turbidez y contaminación.

Los datos de medición de turbidez fueron realizados con el instrumento de medición disco Secchi, el cual toma la medición de la penetración luminosa, las mediciones que realiza se deben tomar siempre de la superficie de la masa de agua, tomando en cuenta la profundidad. Para el estudio se midió la transparencia tomando en cuenta la profundidad, es decir a que profundidad el disco ya no se distinguía, por lo que se necesitó realizar una transformación de datos de transparencia a turbidez. Los datos se transformaron utilizando la ecuación descrita a continuación.

*Ecuación inicial en base a bibliografía*

La ecuación inicial fue utilizada con base en un modelo de regresión de la profundidad del disco Secchi en función a la turbidez (USGS, 2016). En el caso de la ecuación inicial los datos de transparencia se encontraban en pies (ft) y la turbidez en unidades nefelométricas de formacina (FNU), la FNU es la unidad más utilizada en cuanto a determinación de la turbidez con base en la norma europea ISO 7027.

$$Secchi\ Depth = 11.123 * turbidity\hat{}(-0.637)$$

*Ecuación aplicada para el modelo*

Para la aplicación del modelo propuesto se realizó una conversión de unidades de acuerdo con nuestros datos medidos con el disco Secchi de centímetros (cm) a pies (ft) (véase Anexo 4).

$$Turbidity = \left(\frac{11.123}{X}\right)\hat{}\ \left(\frac{1}{0.637}\right)$$

En donde:

x= es la profundidad a la cual el disco Secchi deja de ser visible

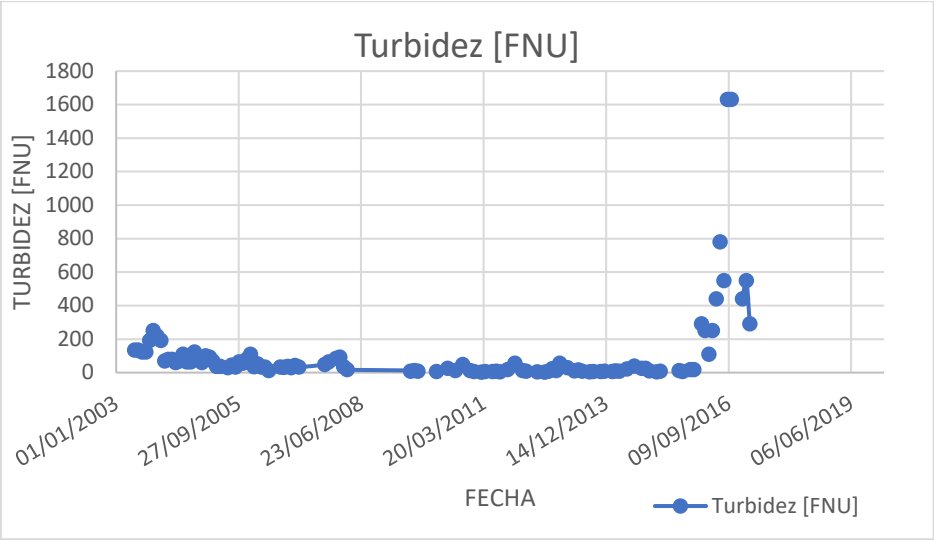


***Figura 9.*** *Datos históricos de turbidez*
Fuente: Elaboración Propia.

Los valores de transparencia en la laguna cuentan con mediciones que van entre 3 a 129 cm, los datos muestran que mientras menor es la transparencia mayor es la turbiedad, el valor más bajo de 3 cm de transparencia nos da una turbiedad de 1630,40 [FNU], los mayores valores se registraron entre los meses de mayo a septiembre (época seca) lo cual muestra que la variación estacional incide en las condiciones del sistema de la laguna.

#### *7.4.1.4. Subsistema Vegetación*

El subsistema de vegetación no cuenta con datos históricos reportados, la falta de datos existentes se debe a que los estudios en la laguna Alalay se centran en la contaminación y no en una gestión de incremento de la vegetación para mejor calidad del agua. El parámetro que se tomará en cuenta para el modelo no son datos sobre la vegetación sino un indicador de incremento de vegetación que estima la biomasa planctónica, la *clorofila a* se encuentra en todos aquellos organismos que contienen cloroplastos en sus células; pertenecen al reino de plantas y protistas, permite a los organismos absorber energía a partir de la luz solar y transformar los compuestos orgánicos y oxígeno, utilizado para identificar los grandes grupos algales.

Es importante mencionar que la laguna Alalay no cuenta con estudios oficiales en cuanto a biodiversidad solo reportajes que no tienen ningún peso científico. Alalay al ser un ecosistema con un valor paisajístico importante para la ciudad, rodeado de serranías posee una vegetación única de especies nativas que alberga a agrupaciones de aves en la zona, e incluso invertebrados y mamíferos pequeños.

En los últimos años las autoridades de la ciudad se han centrado únicamente en reforestar la barrera alrededor de la laguna, con el fin de no perder el valor paisajístico, en 2016 se realizó una reforestación con más de 6.000 plantines, lo que permitió alcanzar alrededor del 70 % de la cobertura vegetal de la extensión de la laguna en los alrededores. Sin embargo, es importante tomar que las especies plantadas no van más allá de proporcionar un valor paisajístico al lugar, algunas de especies serán mencionadas en la tabla 2.

Tabla 2. *Vegetación reforestada Laguna Alalay*

| Nombre común | Nombre científico | Ubicación | Funcionalidad |
|---|---|---|---|
| **Jacaranda** | *Jacaranda mimosifolia* | Cordón de vegetación alrededor de la laguna | Especie nativa – no funcional |
| **Molle** | *Schinus molle* | Cordón de vegetación alrededor de la laguna | Especie nativa – funcionalidad paisajística, especie tolerante a sequias |
| **Tara** | *Caesalpinia spinosa* | Cordón de vegetación alrededor de la laguna | Funcionalidad paisajística |
| **Tajibo morado** | *Tabeibuia impetiginosa* | Cordón de vegetación alrededor de la laguna | Funcionalidad paisajística |
| **Chañar** | *Geoffroea decorticans* | Cordón de vegetación alrededor de la laguna | Funcionalidad paisajística |
| **Cina Cina** | *Parkinsonia aculeata* | Cordón de vegetación alrededor de la laguna | Funcionalidad paisajística |

Fuente: Elaboración propia en base a reportaje Los tiempos, 2018.

### *7.4.2. Parámetros de comparación de datos*

El acápite anterior muestra los subsistemas con los respectivos parámetros a ser estudiados dentro del modelo. Uno de los aspectos más importantes a la hora de aplicar modelos de esta naturaleza es la obtención precisa de valores para los parámetros del modelo, sin embargo, estos valores deben ser estudiados bajo rangos permitidos por la bibliografía correspondiente, en nuestro caso se compararan los datos bajo los niveles permitidos por la *"Ley del Medio Ambiente 1333 boliviana en su aparatado de Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica"* haciendo referencia en su artículo 7º *"Clasificación de los cuerpos de agua según su aptitud de uso; Protección de los recursos hidrológicos*" (véase Anexo 3).

La tabla 3 presenta las variables de calidad del agua comparadas con rangos permitidos como indicadores de acuerdo a leyes e información bibliográfica. Muestra información de unidades, rangos de concentración, parámetros de comparación, límites de detección y frecuencia, y numero de mediciones totales. En base a los datos históricos trabajados se procesaron los datos en el programa estadístico RStudio 4.0.2 para obtener el valor promedio y los máximos y mínimos para cada parámetro.

Tabla 3. *Parámetros de comparación del modelo*

| Grupo de variables | Variable | Nombre completo | Promedio (Rango) | Unidades | Parámetros de comparación | LOQ (LOD) | No. de mediciones |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Fisico-químicos** | Temperatura | Temperatura del agua | 20.3 (10-29.9) | °C | +/- 3 ºC | - | 145 |
| | pH | Porcentaje de hidrogeno (pH alto, pH bajo) | 8.9 (7-10.59) | [-] | 6.0<br>9.0 | 0.1<br>0.1 | 184 |
| | OD | Oxígeno Disuelto | 5.8 (0.2-18) | mg/l | >80% sat <100 | 0.1 | 241 |
| | DBO | Demanda biológica de Oxígeno | 43.5 (1.4-339) | mg/l | <2<br><20 | <br>- | 44 |
| | DQO | Demanda Química de Oxigeno | 161.7 (56-1660) | $mgO_2/l$ | <5<br><40 | <br>- | 37 |

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Nutrientes** | NT | Nitrógeno Total | 2.5 (0.02-21.9) | mg/l | 1.0c N -12c.N | 0.02 (0.01) | 87 |
| | PT | Fósforo Total | 1.1 (0.07-7.3) | mg/l | 0.6-1.7 c. F | 0.04 (0.02) | 210 |
| **Turbidez** | Alta | | 109.3 (3.2-1630.3) | NTU | | - | 106 |
| | Media | | | | | | |
| | Baja | | | | | | |

Fuente: Elaboración propia con base en Berger et al., 2017.

Para los rangos de turbidez se utilizó una bibliografía diferente, debido a que la Ley 1333 no refleja datos permisibles sobre este parámetro.

Cuando hablamos de turbidez del agua y las concentraciones establecidas, la Organización Mundial de la Salud (OMS) establece que el rango de turbidez permisible para consumo humano no debe superar en ningún caso los 5 NTU y estar idealmente por debajo de 1 NTU. En el caso de cuerpos de agua como lagos, lagunas y otros, los parámetros permitidos cuentan con otra escala. Para establecer los rangos de comparación se tomó en cuenta la bibliografía de la página lake Access avalada por la Agencia de Protección Ambiental (EPA) donde se muestran los parametros máximos y mínimos en cuanto a niveles de turbidez para lagos. La tabla 4 presenta los niveles de turbidez en NTU existentes en un lago y la cantidad de partículas orgánicas (algas) existe en esa cantidad de clorofila, lo mismo para las particulas inorgánicas (limo y sedimento) la cantidad existente dentro de esa cantidad de sólidos suspendidos; esto solo muestra una comparativa, el cambio de unidades no varia ya que la relacion es de 1 a 1 (lakeaccess.org EPA, 2020).

Tabla 4. *Parámetros de comparación turbidez*

| | Baja | Media baja | Media | Media alta | Alta |
|---|---|---|---|---|---|
| **Turbidez debido a algas [NTU]** | 2 | 5 | 10 | 20 | 50 |
| **Valores de clorofila** | 2.2 µg clorofila/L | 4.7 µg clorofila/L | 10 µg clorofila/L | 36 µg clorofila/L | 54 µg clorofila/L |
| **Turbidez debido a sedimentos** | 2 | 5 | 10 | 20 | 50 |
| **Valores totales de solidos suspendidos** | 2.2 mg TSS/L | 6.3 mg TSS/L | 12 mg TSS/L | 24 mg TSS/L | 64 mg TSS/L |
| **Turbidez del modelo [FTU]** | **Baja** | **Media** | **Alta** | | |
| | 3.22 | 35.25 | 1630 | - | - |

Fuente: Data for lake access EPA, 2020.

### 7.5. Correlación de datos

Este acápite consistió en identificar la correlación que existe entre parámetros, comparados entre ellos con base en coeficiente de *Pearson*, este índice se obtiene de la suma de los mínimos cuadrados entre dos variables cuantitativas para de esta manera medir el grado de ajuste o relación que existe entre parámetros. Se debe tomar en cuenta que el coeficiente de correlación se da entre -1 y 1, cuando el coeficiente da -1 la correlación es inversa perfecta, cuando es 0 no existe una correlación y cuando es igual a 1 es una correlación perfecta. Se puede decir que los valores superiores a 0.9 son precisos y se pueden tomar en cuenta para realizar comparaciones.

La tabla 5 muestra las correlaciones existentes entre los parámetros utilizados seleccionados para el modelo, se puede exponer que la mayoría de los parámetros no muestran una relación muy estrecha entre ellos, esto se debe a la cantidad y calidad de datos muestreados, sin embargo, por tratarse de datos muestreados *in-situ* mencionar que existe un margen de error ya sea por parte del equipo de muestreo, el método utilizado o los procesos a nivel trófico que se tienen en un cuerpo de agua.

Tabla 5. *Correlación de datos entre parámetros de cada subsistema*

| | | Calidad del Agua | | | | Nutrientes | | Turbidez | | Indicador de Vegetación |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | **pH** | **OD [mg/l]** | **DBO5 [mg/l]** | **DQO [mgO2/L]** | **NT [mg/l]** | **PT [mg/l]** | **Transparencia [ft]** | **Turbidez [FNU]** | **Clorofila [ug/l]** |
| | **+** | **1** | **2** | **3** | **4** | **5** | **6** | **7** | **8** | **9** |
| Ph | **1** | 1 | 0,40700702 | 0,62691944 | 0,32547361 | 0,05294291 | 0,39178179 | -0,066702774 | 0,31894726 | 0,57176608 |
| OD [mg/l] | **2** | | 1 | 0,17328435 | 0,01034272 | -0,20884357 | 0,00602462 | 0,151856226 | -0,24775888 | 0,23821361 |
| DBO5 [mg/l] | **3** | | | 1 | 0,76666297 | 0,55439308 | 0,21592528 | NA | NA | 0,52354599 |
| DQO [mgO2/L] | **4** | | | | 1 | 0,60256815 | 0,92210822 | 0,646657809 | -0,70035415 | NA |
| NT [mg/l] | **5** | | | | | 1 | 0,11196282 | -0,190643672 | 0,38980019 | 0,95765276 |
| PT [mg/l] | **6** | | | | | | 1 | -0,233365937 | 0,42633512 | 0,36688927 |
| Transparencia [cm] | **7** | | | | | | | 1 | -0,41100731 | -0,14763573 |
| Turbidez [NTU] | **8** | | | | | | | | 1 | 0,21205381 |
| Clorofila [ug/l] | **9** | | | | | | | | | 1 |

Fuente: Elaboración propia

### 7.6. Modelación en NetLogo

La dinámica de sistemas para este modelo se realiza con la herramienta NetLogo, un entorno de programación de computadores y modelado diseñado por Uri Wilenski y desarrollado por CCL (The Center for Connectes Learning and Computes Based Modeling CCL). La herramienta se ajusta a la modelización de sistemas dinámicos complejos, analiza las conexiones entre comportamientos a nivel micro y macro, así como patrones que emergen de las interacciones entre ellos (Wilensky, 2012).

La herramienta de NetLogo cuenta con dos técnicas muy utilizadas dentro del modelado computacional, el modelado con agentes y los sistemas dinámicos. La dinámica de sistemas es utilizada ampliamente para modelizar sistemas en ingeniería (Ford, 1997; Ford & Sterman, 1998; citado en Izquierdo, et al., 2008). Para este estudio se utlizara sistemas dinámicos que se encuentra representada por el modelador de diagramas causales, este gira entorno a un concepto de retroalimentacion o causalidad circular entre varibles observables. En el caso de la herramienta de NetLogo "no es necesario programar el comportamiento de los elementos con códigos ya que el programa los crea a partir del diseño del diagrama, sin embargo, se necesita introducir valores de partida en cada elemento y controlar las relaciones con flujos influidos por variables manipulables mediante la creacion de deslizadores" (Merino, 2014, p,51).

El modelador de dinámica en sistemas en NetLogo contine los siguientes elementos, que seran descritos a continuación (vease figura 17).

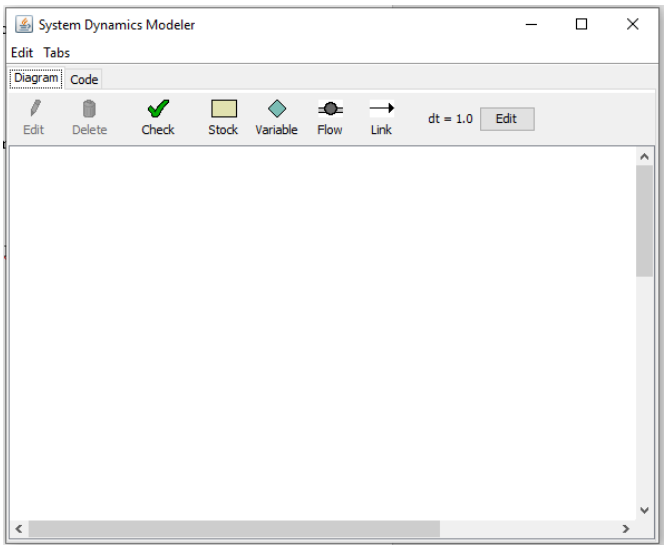


***Figura 10.*** *Diagrama del modelador de sistemas dinámicos*
Fuente: NetLogo, 2016

*Stock:* Se encuentra simbolizado por un cuadrado y representa un elemento del conjunto el cual contiene un valor inicial.

*Variable:* Se encuentra simbolizado por un rombo y una caja donde se añade un nombre especifico, el cual es utilizado por el procedimiento o una variable global, deben ser incluidas con un valor numérico o función.

*Flow:* Se encuentra simbolizado por una tubería con un grifo, este botón ayuda a controlar cuanto y que circula de un lado a otro.

*Link:* Se encuentran simbolizados por una flecha que puede ser predispuesta a una variable, stock o flow, sin embargo, son los enlaces los que dan el un valor.

Además de estos botones se cuenta con un modelador que es la imagen de como el valor de los niveles va cambiando con el tiempo al recalcularnos una y otra vez según los lapsos de tiempo que señalemos (Wilensky, 2012; citado en Merino, 2014 p.51)

# 8. Desarrollo y Análisis de Resultados

## 8.1. Subsistemas

Con base en el análisis de correlación del coeficiente de *Pearson* se procedió a realizar una relación de parámetros de acuerdo con cada subsistema establecido.

### *8.1.1. Subsistema de la Calidad del Agua*

#### *8.1.1.1. Temperatura*

Los reportes históricos de temperatura recopilados en los tres puntos pertenecen a diferentes lugares por lo tanto cuentan con características propias dentro de la columna de agua, sin embargo, la temperatura en un estado trófico tiende a mantenerse a cierta profundidad debido a la capa de algas y macrófitas que se tiene en la laguna.

La dispersión de los datos obtenidos en la columna de agua muestra un cambio relativo de la temperatura de acuerdo a la variación estacional, los datos más altos hacen referencia a la época seca, a diferencia de los datos más bajos obtenidos en época de lluvia, sin embargo, los datos no presentan cambios bruscos debido al clima de la ciudad, los mínimos obtenidos son de 10 º C.

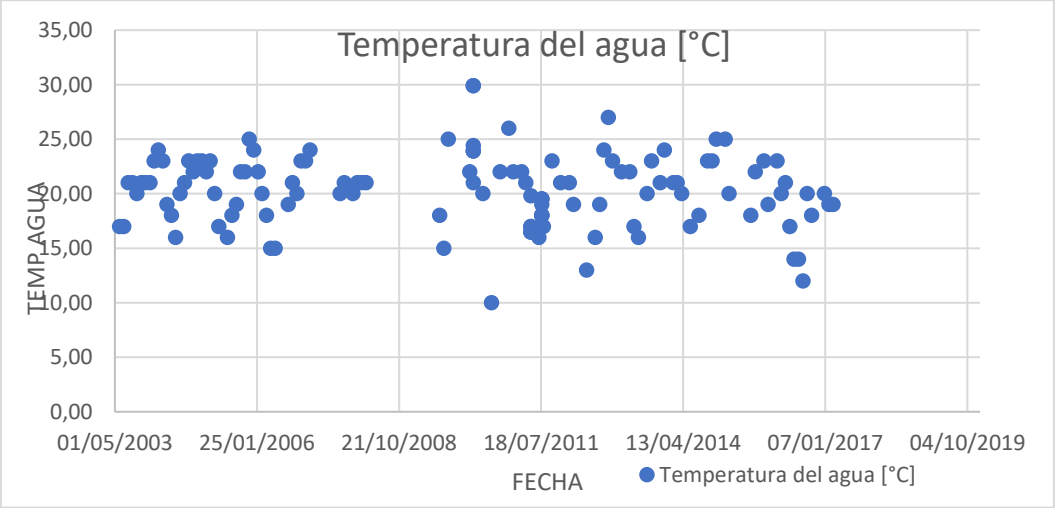


***Figura 11.*** *Temperatura del agua*
Fuente: Elaboración propia.

#### *8.1.1.2. pH, OD, DBO, DQO*

Para los parámetros de pH, OD, DBO y DQO, se realizaron dos figuras con el fin de ver la correlación que existe, no fueron analizadas independientemente debido a que no representaban nada concreto. Además, se tomaron datos desde 1990 para adelante, ya que no se tienen datos antes de ese año.

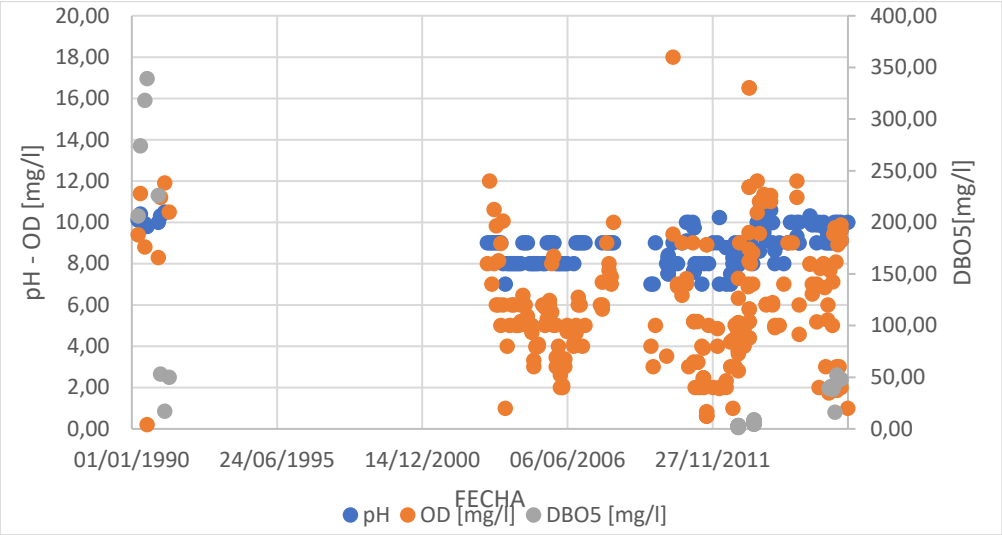


***Figura 12.*** *Parámetros pH, OD, DBO5*
Fuente: Elaboración propia.

La figura 10 muestra que existe una fuerte variabilidad en los niveles de OD, acorde a los años estos se fueron incrementando, lo que probablemente muestra que el lago cuenta con etapas importantes a nivel trófico, los valores altos hacen referencia a que existe una fuerte actividad biológica producida por el fitoplancton, la cual se incrementa a través de la fotosíntesis; esto viene ligado al pH donde vemos que a niveles de pH de 10 existe la relación de una elevada actividad biológica.
Por otro lado, los valores bajos de OD concuerdan con la variabilidad estacional seca donde a temperaturas altas de agua existe un consumo excesivo OD por parte de las bacterias y otros organismos que pueden forman una sobrepoblación dejándola a niveles muy bajos.

Además, se puede señalar que tanto el OD, DBO y DQO están correlacionados, en la figura 13 se puede ver la dependencia que tiene el DBO con el OD a una actividad microbiana fuerte (bajas concentraciones de OD) como por ejemplo la época seca se tienen mediciones altas de DBO, lo propio para la DQO a bajas concentraciones de oxígeno es probable que muestre alguna toxicidad que podría estar en este caso relacionada con el exceso de nutrientes.

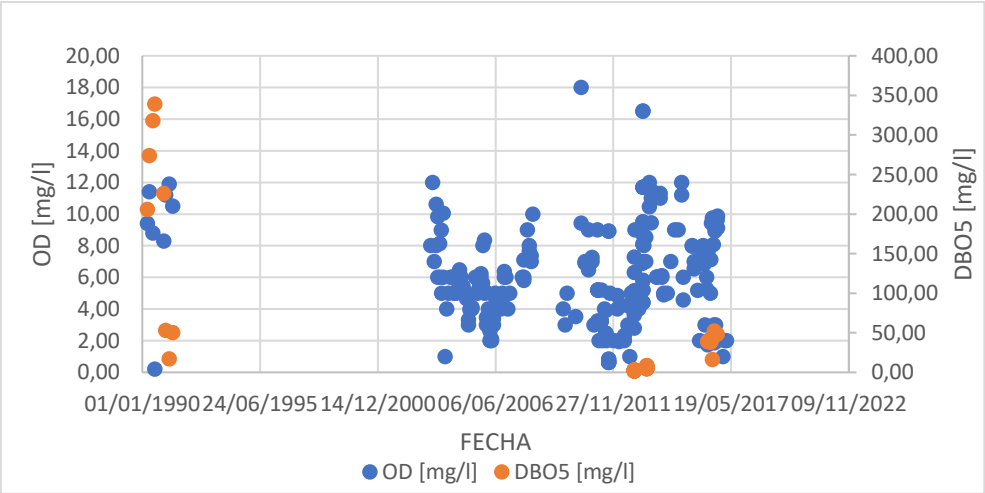


***Figura 13.*** *Relación OD vs DBO5*
Fuente: Elaboración propia

### *8.1.2. Subsistema de Nutrientes*

El subsistema de nutrientes representado por el NT y PT se muestra en la figura 14, la tendencia toma en cuenta dos grupos representativos; el primero alrededor del año 2000 y el segundo grupo entre los años 2013 a 2016, para el último grupo las mediciones de los dos parámetros fueron muestreadas con más frecuencia, obteniéndose mediciones altas para el PT.

La laguna Alalay tiene un ingreso fuerte en cuanto a N, sin embargo, se encuentra limitado y es captada por la vegetación existente en comparación con el P, el cual se encuentra en grandes cantidades, este ingreso de P a la columna de agua no solo se debe a ingresos de fuentes antropogénicas sino también de la vegetación que se descompone y del exceso de vientos en la zona que remueve los sedimentos del fondo esparciéndolos por toda la laguna e incrementando la cantidad del P, los dos últimos aspectos son más difíciles de controlar debido a la dificultad en su medición.

Dependiendo de la concentración existente de P en el agua puede producirse eutrofización, con un solo 1 g de P se provoca el crecimiento de hasta 100 g de algas. Los datos de fósforo total (PT) tomados en la laguna Alalay fueron diversos en los tres puntos de muestreo, lo que mostrará un cambio representativo en el modelo, si la laguna tiene niveles de P que indican eutrofia.

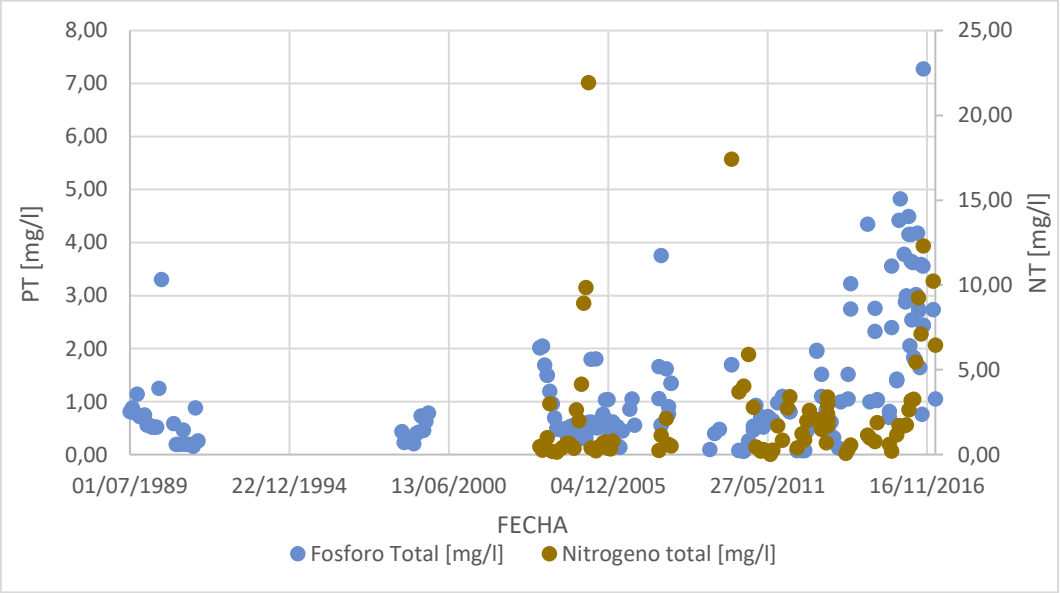


***Figura 14.*** *Nutrientes NT y PT*
Fuente: Elaboración propia

### *8.1.3. Subsistema de Turbidez*

El subsistema debe ser comparado con algún parámetro característico de su incremento en la laguna, como se mencionó en el apartado anterior de nutrientes el P puede producir eutrofización en la columna de agua, la figura 15 muestra que a menores concentraciones de P existe mayor turbidez. El P limita el crecimiento de fitoplancton lo que promueve una mayor proliferación de *bloom* algal causando una mayor turbidez.

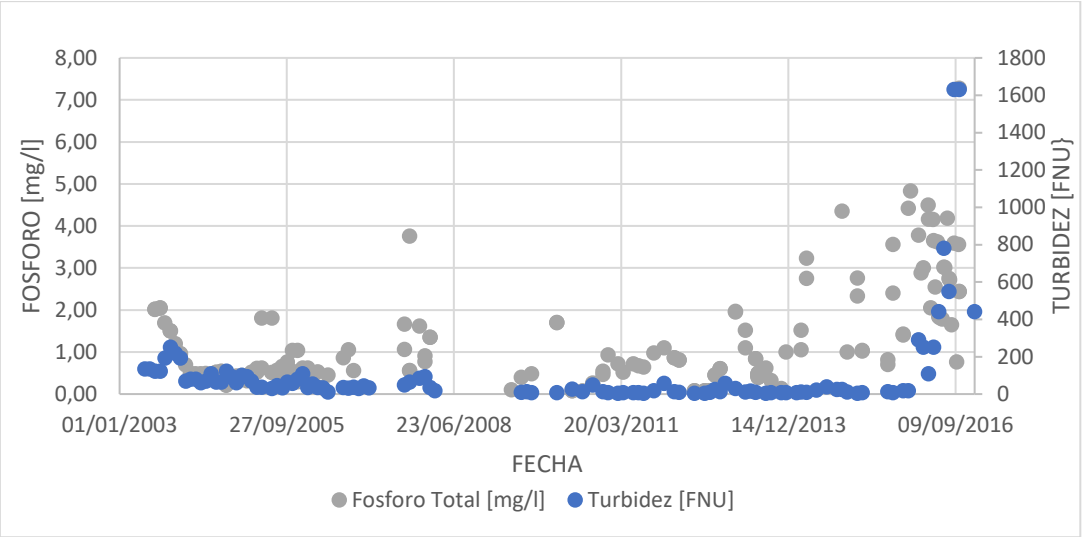


***Figura 15.*** *Turbidez vs PT*
Fuente: Elaboración propia

### *8.1.4. Subsistema de Vegetación*

El subsistema de vegetación tomará en cuenta como indicador la clorofila como se mencionó en la metodología, esto debido a que no existe datos sobre este subsistema. En la correlación del coeficiente de *Pearson*, el parámetro de clorofila tiene una correlación de 0.95 lo equivale a un 95% de correlación con el NT.

La relación que muestra la clorofila con el N se debe a que cuando existe un ingreso de N a la columna de agua el nivel de clorofila aumenta, esto se plasma en la figura 16, el punto más alto de clorofila se debe a un muestreo de alto contenido de N.

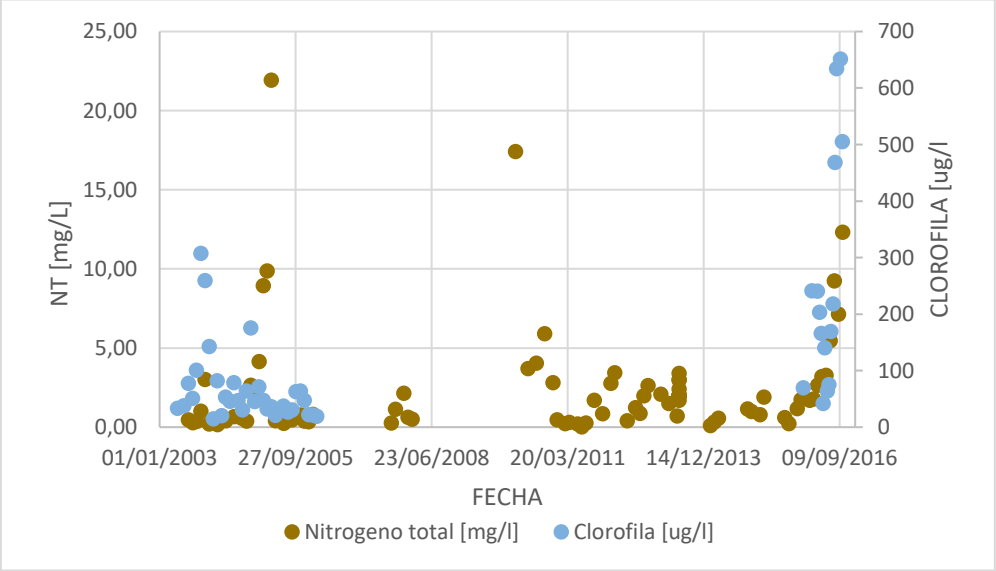


***Figura 16.*** *Clorofila vs NT*
Fuente: Elaboración propia

## 8.2. Modelo Conceptual de la Laguna Alalay en NetLogo

El modelo conceptual propuesto fue programado mediante los subsistemas y variables elegidas con base en el diagrama causal presentado en la figura 7. Las variables propuestas pertenecen a los subsistemas de calidad de agua, vegetación, nutrientes y turbidez del agua, se definieron mediante un stock para luego incluir los parámetros y crear vínculos de incidencia unos entre otros, para este paso se utilizaron las ecuaciones descritas en el capítulo 7.3 utilizando los flujos del programa para poder representar el modelo en la ventana plot

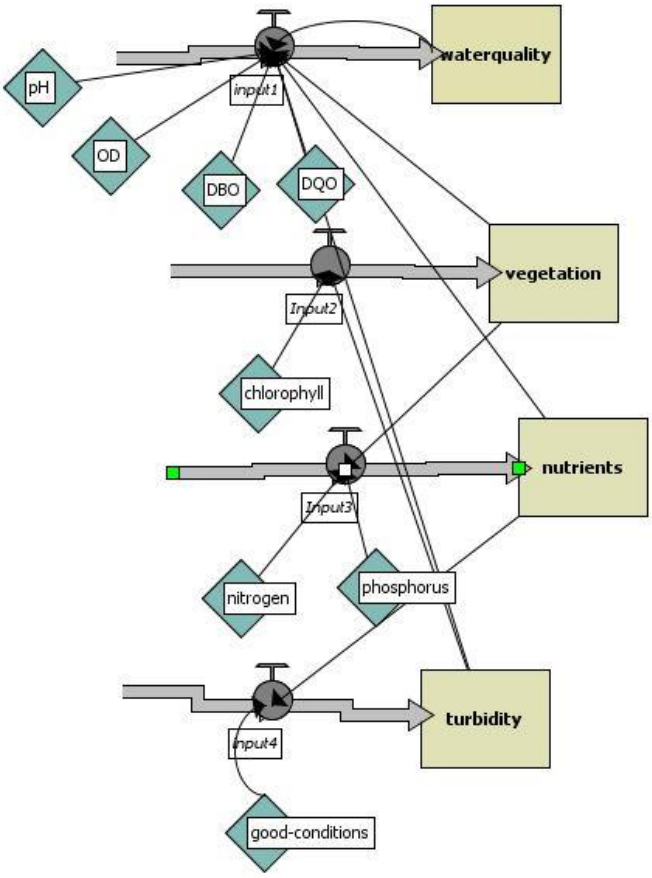


***Figura 17.*** *Diagrama del modelo causal en NetLogo*
Fuente: Elaboración propia

El modelo presentado mediante el diagrama no representa las condiciones de la laguna Alalay, esto debido a que los datos de las variables con las que se realizó el modelo no tienen una representatividad continua, los datos históricos para algunos parámetros no cuentan con un muestreo continuo, además de ser colectadas por diferentes entidades dentro del ámbito científico donde el método para la toma de muestras puede ser diferente, esto representó un obstáculo para la utilización del modelo.

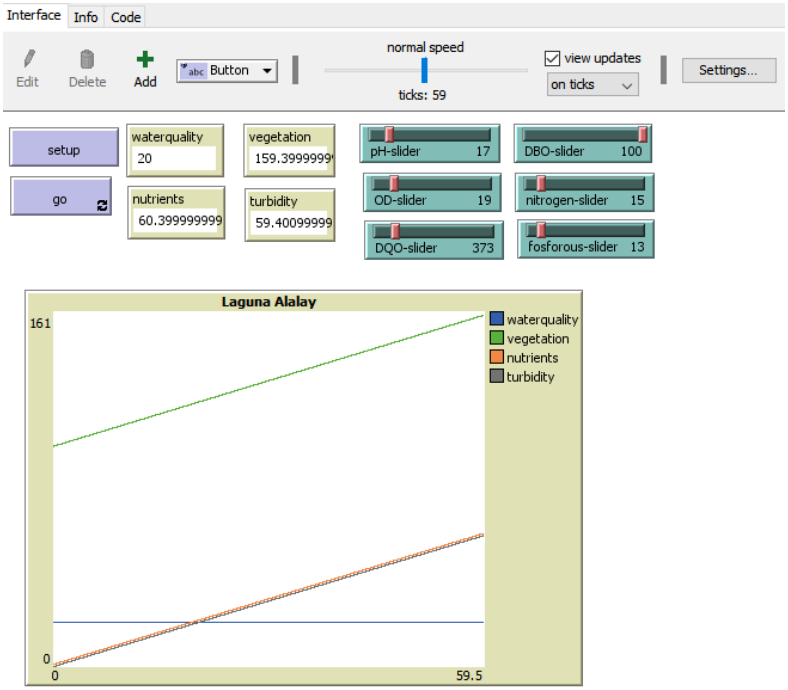


***Figura 18****.Ejecución del modelo en NetLogo*
Fuente: Elaboración propia

### 8.3. Reajuste de Variables

Con base en el análisis de correlación de datos obtenidos y tomando en cuenta la poca relación que existe entre ellos se volvió a analizar la tabla de datos iniciales con el fin de obtener una uniformidad en los datos históricos que exprese una continuidad del muestreo realizado *in-situ.* A esto se aplicó nuevamente el coeficiente de Pearson obteniendo una nueva correlación con mayor uniformidad, la correlación obtenida cuenta con 8 variables y 104 observaciones realizadas en RStudio.

La figura 19 muestra la correlación obtenida de los datos históricos, donde la gama de colores azules se degrada de forma descendente hacia la menor correlación de 1- 0.2 y la gama de colores rojos asciende hasta llegar a -1, donde existe una correlación inversa perfecta. La correlación que tiene un mayor valor es la conductividad y profundidad, debido a que a mayor profundidad existe una menor conductividad, esto puede deberse a que el *bloom* algal concentra la mayor parte de sales eléctricamente cargadas en la parte superior de la columna de agua.

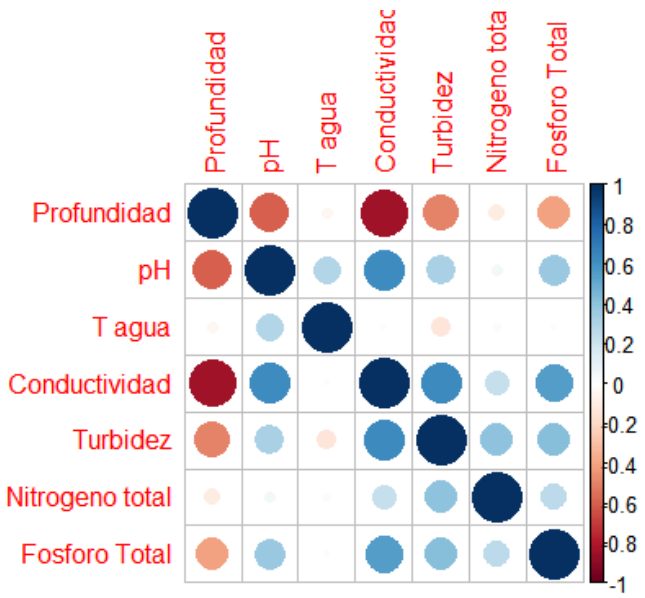


***Figura 19.*** *Correlación de datos históricos con base en el coeficiente de Pearson*
Fuente: Elaboración propia

Tabla 6. *Reducción de los datos históricos*

| Parámetros | Variable | Media | Máximo | Mínimo |
|---|---|---|---|---|
| **Físico - químicos** | Profundidad [cm] | 185.7 | 305 | 53 |
| | pH | 8.8 | 10 | 7 |
| | Temperatura del agua [º C] | 20 | 27 | 0 |
| | Conductividad [µS/cm] | 2356 | 7533 | 890 |
| | Turbidez [FNU] | 110.3 | 1630.3 | 3.2 |
| | NT [mg/l] | 1.9 | 21.9 | 0 |
| | PT [mg/l] | 0.9 | 4.4 | 0 |
| | OD [mg/l] | 5.5 | 18 | 1 |

La tabla 6 muestra los valores de media, máximos y mínimos de las nuevas variables, esta información fue obtenida mediante RStudio.

### 8.3.1. Análisis de Componentes Principales (PCA)

Para reducir la dimensionalidad del conjunto de datos que se obtuvieron en la nueva correlación, se realizó un análisis de componentes principales (PCA) que muestra el menor número de variables transformadas que expongan la mayor variabilidad en los datos.

RStudio fue utilizado para ejecutar el PCA mediante el cual se obtuvieron 8 variables. El diagrama de dimensiones presentado en la figura 20 muestra que existen 3 grupos o clústeres principales, el primer clúster está formado por OD y temperatura del agua. Esta relación es importante ya que el oxígeno al igual que todos los gases tiene diferentes solubilidades a diferentes temperaturas del agua (Sawyer & McCarty, 1978). En la laguna Alalay los niveles de OD suben durante el día debido al clima y la incidencia solar con la que se cuenta, elevándose y causando una mayor reacción de fotosíntesis en las algas, e incrementando los niveles de oxígeno en la columna de agua. Cuando la biomasa algal muere su descomposición aeróbica resulta en una caída brusca de los niveles de OD.

El segundo clúster está formado por el pH y la conductividad. La laguna cuenta con un pH básico extremo, lo que hace que la conductividad sea alta, además de ser un ambiente salobre donde gran parte de la conductividad viene de los iones de $Na^+$ y $Cl^-$.

El tercer clúster se encuentra formado por el PT, NT y turbidez, la relación con la que se cuenta en la laguna Alalay es inversa, ya que existe una limitación de N. Con todo ingreso de N, el P al ser consumido por los organismos tiende a bajar, causando un incremento de la turbidez.

La figura 20 representa la varianza explicada por dos componentes (*Dim1)* y (*Dim2*) donde las variables positivas se encuentran agrupadas próximas mientras que las que están negativamente correlacionadas se representadas en el lado opuesto. En este caso el clúster número tres es el que se tomara en cuenta para el modelo experimental en NetLogo (el clúster que incluye N, P y turbidez). Nótese en la misma figura que la varianza acumulativa explicada por dim1 y dim2 es 62%, mediante el uso del cos2 (el cual muestra cuán bien representada esta una variable por los componentes principales), se puede mostrar que la conductividad, pH, profundidad, turbidez y OD, son las variables mejor representadas.

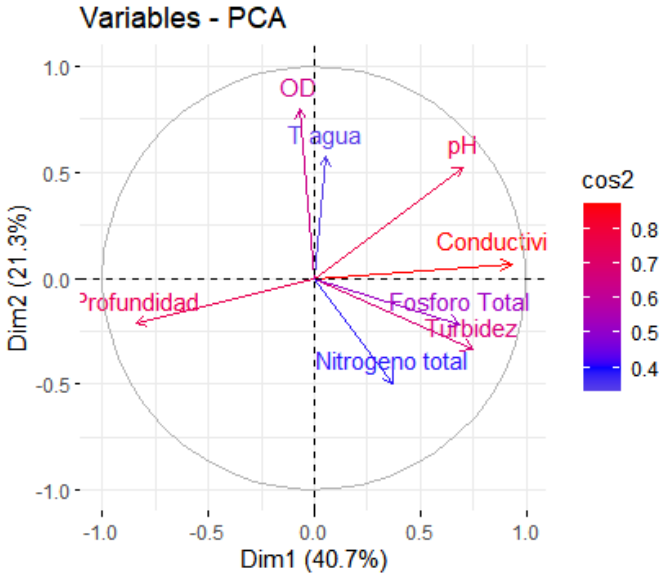


***Figura 20.*** *Análisis de componentes principales PCA y PCA2*
Fuente: Elaboración propia

La figura 21 muestra la correlación temporal entre los parámetros turbidez, NT y PT. Estos parámetros son los que mejor correlación tienen de acuerdo a su agrupación en el segundo cuadrante del sistema de ejes cartesianos representado en la figura 20.

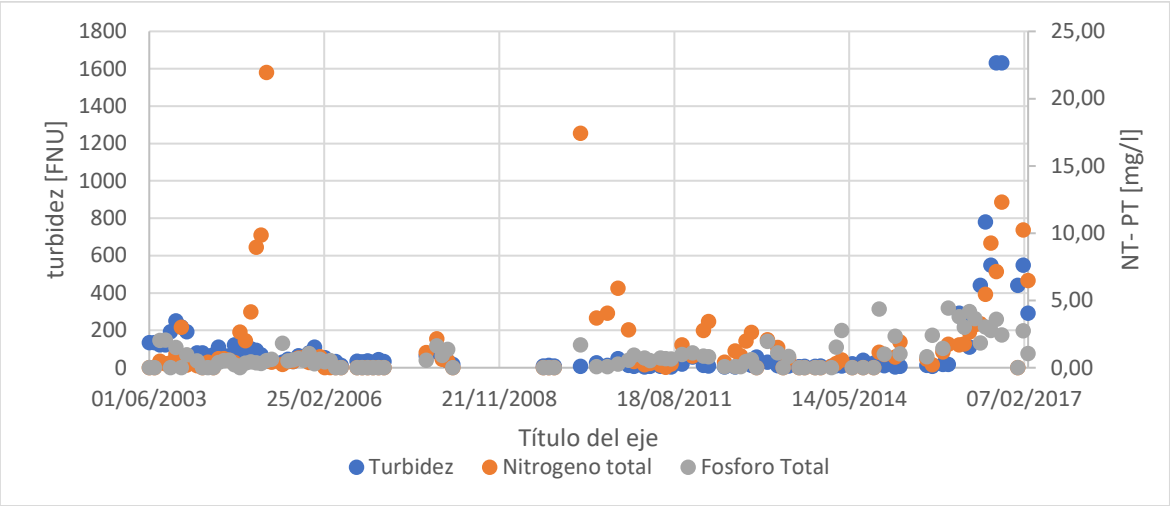


***Figura 21.*** *Representación del NT, PT y turbidez*
Fuente: Elaboración propia

### 8.3.2. Nuevo Modelo Propuesto para Laguna Alalay

La nueva versión del modelo propuesto se ajusta a los parámetros correlacionados obtenidos en el PCA (figura 20), estos parámetros se utilizan para un nuevo diagrama causal donde incide la turbidez y los nutrientes. El diagrama causal muestra la retroalimentación negativa que existe entre estos parámetros. El parámetro de nutrientes está definido por NT y PT, la retroalimentación negativa entre la turbidez y los nutrientes se debe a la cantidad de nutrientes que entra en la columna de agua y crea condiciones en el ecosistema que causan la turbidez (véase figura 22).

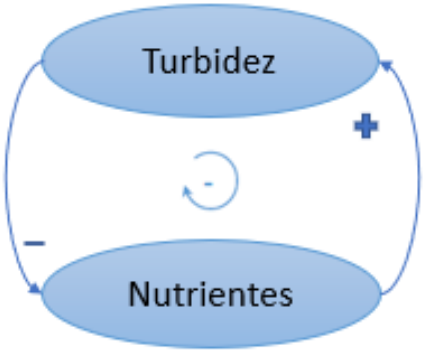


***Figura 22.*** *Diagrama causal del modelo Alalay*
Fuente: Elaboración propia

La ecuación 5 pertenece al diagrama causal del nuevo modelo (figura 23) donde existe una entrada de N que ingresa al inflow, multiplicado por la turbidez por la flecha que ingresa; se tiene un ingreso de turbidez menos el P.

$$\frac{dT}{dt} = N * T(T - P) \tag{5}$$

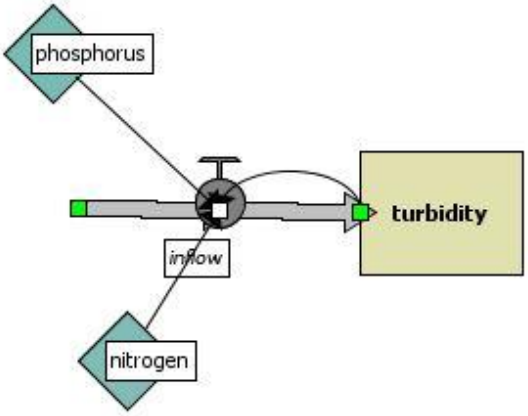


***Figura 23.*** *Diagrama del Nuevo Modelo*
Fuente: Elaboración propia

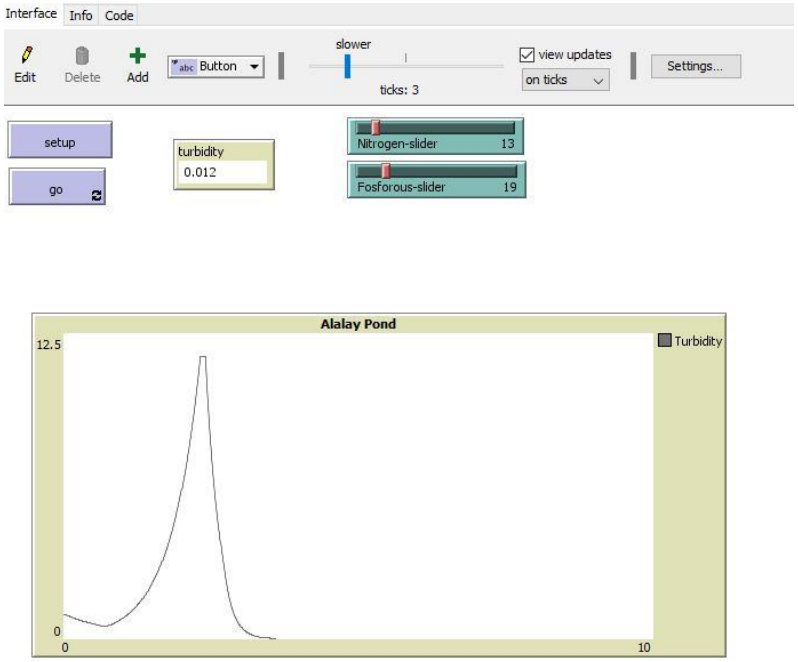


***Figura 24.*** *Gráfica del Modelo*
Fuente: Elaboración propia

El diagrama experimental realizado en NetLogo con variables reducidas como anteriormente se mencionó, muestra las condiciones iniciales del ingreso de nutrientes al cuerpo de agua, en el

modelo se aplicó datos reales obtenidos de los datos históricos, datos máximos muestreados en la laguna para las variables de NT y PT, para la turbidez se tomó en cuenta el valor inicial de 0.02 que es lo mínimo que se puede asumir para condiciones de agua ultrapura (IDEAM, 2007). La simulación obtenida se asemeja al comportamiento que se tiene en la laguna donde a bajas concentraciones de P la turbidez crece y cuando las condiciones de esta empiezan a subir la curva comienza a descender (véase figura 24).

### 8.3.3. Analogía de Condiciones Reales de la Laguna Alalay

La laguna Alalay es un ecosistema que cuenta con una complejidad de procesos no solo a nivel físico-químicos sino también a nivel trófico, las condiciones fisicoquímicas se encuentren en un constante cambio en la columna de agua a esto se debe incluir que las condiciones cambian de acuerdo con la variación estacional. En la literatura se ha defino a la laguna Alalay como un ecosistema hipereutrófico que cuenta con condiciones de valores muy superiores a los reportados en lagunas eutróficas (Morales et al, 2017; con base en Wetzel, 2001).

Las variables utilizadas para producir el sistema dinámico no tienen un efecto mayor al 77.3 % de efectividad, existe un residual de variancia que no esta siendo explicada por factores ajenos, es posible que factores como radiacion solar, espacio, $N_2$ atmósferico, salinidad, entre otros, puedan contribuir a una mejora de muestras observadas. A esto se toma en cuenta que los tres puntos de muestreo de datos realizados *in-situ* causan una variación en cuanto a interpretación de datos, realizando la revisión de la bibliografia correspondiente con base en el estudio realizado por Morales et al. (2017) sobre floracion algal producida en la laguna, se analizó cómo es la relación que se tiene en cuanto a parámetros fisico-químicos asociados al nivel trófico.

Cada punto de muestreo se comporta de manera diferente a los otros, siendo cada uno un sistema dinámico a nivel temporal. Como se puede ver en la (Figura 25), cada fecha de muestreo aparece en un cluster diferente de manera que en cada punto las variables representadas por los vectores y las especies identificadas sufren cambios a lo largo del estudio. Las muestras utilizadas en el estudio presentan cambios significativos entre una y otra, además de contener una gran cantidad de células, tipica de condiciones hipereutroficas. En el caso de la cianobacteria *Arthrospira fusiformis*, en el punto 1 en fecha 8 de junio se hallaron una 1.421.084,30 célula/ml, es decir, que aproximadamente por cada 20 gotas de agua existe esa cantidad de células algales. En una segunda muestra correspondiente al punto 2 muestreado en la misma fecha se halló una cantidad de 1.620.783,10 células/ml; la diferencia es de 1.999 células/ml por ml aproximadamente. Esto muestra una gran diferencia espacial.

Los parámetros elegidos para el modelamiento de la turbidez y un cambio de la misma se basa en que los cuerpos de agua de esta naturaleza presentan grandes cantidades en N y P, lo que nos lleva a estudiar el NT y PT. Las concentraciones de N suelen ser un limitante en la laguna Alalay, las formas de N se encuentran en bajas concentraciones o son rapidamente y procesadas por el sistema, convertidas a nitratos por lo que son representativas del NT, cuando existe ingresos de N en la columna de agua estos son rápidamente absorbidos por la vegetación, dejando muy poca cantidad disponible en la en la zona pelágica o superficial (Morales et al., 2012; Morales et al., 2013; Morales et al., 2015).

El PT representa todo el P incluido de la columna de agua, tanto diluido como contenido en organismos. Los procesos que genera en la columna de agua se relacionan con un desarrollo algal abundante, las algas necesitan grandes cantidades de P para reproducirse, dejando una mínima cantidad de fósforo soluble (PS) para la reproduccion de otros organismos, en cuanto a la composición bacteriana apenas percibe una liberación de P lo utiliza rápidamente dejando muy poco P en la columna de agua, a todo este proceso se atribuye las grandes concentraciones de fósforo en la laguna. Es importante notar que el PS que es la fracción que esta fuera de las células

no tiene una correlación con abundancia de especies y esto puede deberse a la rápida incorporación del P biodisponible en la columna de agua por parte de la biomasa, es probable que los muestreos obtenidos no logren detectar ese cambio brusco (Morales et al., 2017). Es importante mecionar que en el mismo estudio de Morales (2017), se hizo una relación de N con P (relacion N/P) durante el *bloom* algal que es la proliferación de algas que causa eutrofización y por ende turbidez, donde la laguna comienza a estar limitada por P y no por N como lo era antes del *bloom*.

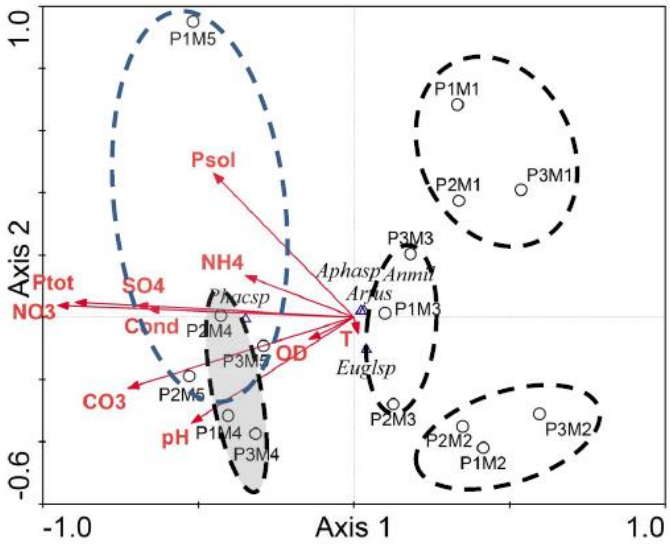


***Figura 25.*** *Clúster de puntos de muestreo; CCA de especies vs variables ambientales*
Fuente: Morales et al., 2017

# 9. Discusión General de Resultados

Según los datos históricos obtenidos, la laguna Alalay es un sistema complejo e hipereutrófico que cuenta con una amplia variabilidad a nivel ecosistémico, a pesar de esto el modelo trata de representar las variables propuestas de acuerdo a la realidad de la laguna.

Uno de los problemas más importante que se tuvo para la realización del estudio es la falta de datos y la dificultad para obtenerlos. No existe una continuidad en los datos que ayude a la realización de estudios de la laguna Alalay. Además de mencionar que no existe ninguna evidencia de control de la calidad de los datos por parte de ninguna de las instituciones de las que se los obtuvo. Los datos obtenidos tuvieron que ser pre-procesados con el fin de obtener los parámetros con mayor correlacionados para el modelo.

Se menciona también que el primer modelo que se planteó no pudo ser representado debido a que no se cuenta con una serie de datos uniforme para el estudio. El segundo modelo, presentado en este trabajo, representó una mínima parte de todos los procesos que se tienen en la laguna (Morales et al., 2017; Ayala et al.2007); en este trabajo solo se presenta la dinámica entre la turbidez y los nutrientes (NT y PT).

A través del análisis del modelo y gracias a la manipulación de los parámetros se identificaron patrones de comportamiento en el sistema de acuerdo a la realidad de la laguna. El incremento y decremento de la turbidez se encuentra ligados a la cantidad de nutrientes que se tienen en la columna de agua.

Realizar un seguimiento continuo de estos parámetros junto a la aplicación de algún sistema de gestión ayudaría a mejorar las condiciones de la laguna. Además, es importante mencionar que el presente trabajo es pionero en la modelización de este tipo en la laguna Alalay.

# 10. Conclusiones y Recomendaciones

La elaboración de modelos mediante el software de simulación NetLogo nos permite representar el comportamiento de ecosistemas desde un punto de vista sistémico. Estos comportamientos profundizan el estudio de las relaciones que comprometen el modelo ya que existen una infinidad de aspectos que no son percibidos a simple vista.

Independientemente del modelo resultante y la validez de este, el proceso de obtención de las condiciones para implementar un modelo en un ecosistema acuático con lleva una recopilación y análisis de información que debe ir relacionada con los elementos que constituyen el sistema. Sin embargo, a pesar de la gran cantidad de aspectos seleccionados para el estudio no se pudo plasmar completamente la dinámica que existe en la laguna Alalay, solo se obtuvo una aproximación de la dinámica que tiene la turbidez involucrando aspectos importantes que la originan, además de respaldar estos aspectos mediante información la bibliográfica correspondiente.

Se recomienda que en el futuro se amplié el modelo estudiado con una serie de datos más uniforme, tomando en cuenta las variables propuestas inicialmente.

Como medidas de gestión se recomienda tomar en cuenta los siguientes puntos:

- Se debe cumplir la legislación de protección y conservación de la laguna Alalay como Patrimonio Natural y Ecológico del Municipio de Cercado.
- Se deben de establecer límites de apropiación tanto en el área circundante a la laguna como dentro del espejo de agua.
- Promover el desarrollo sostenible del área circúndate a la laguna Alalay
- Sancionar el vertido de residuos en el cuerpo de agua.
- Realizar controles de vertidos químicos a la laguna Alalay.
- Se debe realizar un apoyo técnico a las fábricas, con el fin de realizar una buena disposición y reducir la carga de contaminantes en sus efluentes.
- En caso de vertidos químicos por parte de las industrias alrededor de la laguna, realizar un control de la disposición de sus residuos y sancionar con multas elevadas a cualquier incumpliendo.

## 10.1. Plan de restauración de la flora nativa

Como se ha mencionado a lo largo del documento, la laguna Alalay no solo cuenta con problemas de exceso de nutrientes (eutrofización), además existe una serie de factores externos que inciden en el sistema como factores antropogénicos (contaminación) y climáticos.
A través del planteamiento de modelos se pudo notar que la laguna presenta una variabilidad en los subsistemas estudiados, cada uno de los subsistemas representa un entorno que, si bien se encuentra unificado en un ecosistema complejo, requiere ser gestionado de manera independiente.

La información analizada a través de nuestro modelo muestra que es de vital importancia la introducción de vegetación que ayude al ecosistema a mejorar sus condiciones a través de la captura de nutrientes. Esta captura se realiza por dos procesos principales, la absorción de esos nutrientes y su incorporación en tejido vegetal que será luego periódicamente cosechado. El segundo proceso consiste en la adsorción de materia vegetal y sedimentos ricos en nutrientes que también pueden ser removidos. En una situación óptima de funcionamiento normal del ecosistema la vegetación sumergida ayuda a reducir la situación eutrófica, reduciendo la turbidez (Scheffer (1999).

Como propuesta de mejora en la gestión de la laguna se debe tomar en cuenta varios aspectos:

1) Viabilidad y compromiso por parte de las autoridades competentes.
2) Las propuestas de mejoramiento deben estar de acuerdo con la realidad socioeconómica de la ciudad de Cochabamba.
3) Los planes de mejoramiento deben ser desarrollados por etapas, esto con el fin de acomodarse a la realidad y disposición de las autoridades.
4) Las autoridades competentes deben involucrar a la población en la mejora y cuidado de la laguna; además de tomar en cuenta aspectos sociales dentro del marco de los Objetivos de desarrollo sostenible (ODS).

Una de las medidas que se podría tomar en cuenta para la restauración de vegetación emergente o sumergida de la laguna, es centrarse en cuales son los puntos de la laguna que cuentan con un mayor porcentaje de clorofila; esto con el fin de aprovechar el potencial que existe en esos puntos, reinsertando especies que ayuden en la captura de nutrientes y enriquezcan el ecosistema algal.

Una de las especies nativas más representativas de la laguna es la totora, una especie que enriquece el ecosistema y que en sus tallos y hojas da soporte a comunidades algales que nutren a protozoarios y otros organismos que sirven de alimento a peces, estructurando de esa manera al ecosistema. La totora absorbe y adsorbe nutrientes de modo que su manejo (extracción periódica) puede significar una extracción importante de nutrientes que finalmente signifique la reducción de la turbidez.

La tabla 7 propone que especies pueden ser restauradas en la laguna Alalay para una mejora de la calidad del agua.

Tabla 7. *Especies propuestas*

| Nombre Común | Nombre científico | Forma de vida | Ubicación | Funcionalidad |
|---|---|---|---|---|
| Espadaña (totora) | *Typha domingensis* | Emergente | Bordes del cuerpo de agua | Restauración de humedales. Absorción y adsorción de nutrientes. fijador de N, gran capacidad de fotosíntesis, estabilizador de sedimentos, sustrato para comunidades de microorganismos y anidación de aves |
| Juncos | *Scirpus* sp. | Emergente | Cuerpo de agua | Producción de cantidad de biomasa en poco tiempo, depurador de aguas, eliminador residuos por exceso de nutrientes y peces y organismos existentes |
| Lirio acuático | *Eichhornia crassipes* | Flotante | | Fijadores de N, P, debe ser controlada por ser una especie invasora |
| Tipa | *Tipuana tipu* | Paisajística | Corredor de protección de la laguna | Fijador de N, resistente a sequias |

| | | | |
|---|---|---|---|
| Acacia | *Acacia* spp. | Paisajística | Fijador de N |

Fuente: Elaboración propia.

La restauración de especies nativas más la incorporación del modelo propuesto puede dar paso a una metodología de gestión de la laguna. Una vez realizada la restauración, se puede empezar a tomar mediciones de datos continuos de los parámetros de turbidez, P y N e insertarlos al programa con el fin de ver los comportamientos de cambio que se pueden dar en la curva de turbidez, obteniendo así una base de datos de evolución de estos parámetros.

También puede realizarse un monitoreo de observaciones con base en el crecimiento de totoras y expansión de las mismas en diferentes puntos del cuerpo de agua.

## 11. Bibliografía


Acosta, F., & Ayala, R. (2007). Hacia la gestión de lagunas urbanas: La experiencia en la Laguna Alalay (Cochabamba - Bolivia). (M. &. Castro, Ed.) *CYTED-Programa Internacional de Interculturalidad Chile*, 409 pp.

Ari Barcaya, J. O. (2010). *Balance hídrico y cuantificación de la carga de nutrientes en la Laguna Alalay.* Universidad Mayor de San Simón UMSS, Facultad de Ciencias y Tecnologia , Cochabamba, Bolivia.

Ayala, R., Acosta, F., Mooij, W. M., Rejas, D., & Van Damme, P. A. (2007). Management of Laguna Alalay: a case study of lake restoration in Andean valleys in Bolivia. *Aquat Ecol 41*, 621-630.

Beltrami, E. (1987). *Mathematics for dynamic modeling.* Nueva York: Academic Press.

Biggs, R., Carpenter, S. R., & Brock, W. A. (2009). Turning back from the brink: detecting and impeding regime shift in time to avert it. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, 106.826-831.

Brahi, V. (2004). L' eau et L' environnment aquatique: l'eutrophisation et l'enrichissement en nutriments. *Rapport Analytique 2006-2007*, 387-395.

Cadima Fuentes, M. M. (1998). Algas y Macrofitas de La Laguna Alalay. *Revista Boliviana de Ecologia y Conservacion Ambiental 3*, 35-46.

Camargo, J., & Alonso, A. (2006). *Ecological and toxicological effects of inorganic nitrogen pollution in aquatic ecosystems: Aglobal assessment.* Environment International 32.

Carpenter, S. C., Caraco, N. F., Correll, D. L., Howarth, R. W., Sharpley, A. N., & Smith, V. H. (1998). "Nonpoint Pollution of Surface Waters with Phosphorus and Nitrogen" . *EcologiccalSociety of America, Numero 3*.

Catañe, P. M., Lopez, C. R., Olguín, F., Puig, A., Rovedatti, M. G., Topalián, M. L., & Salibián, A. (1998). Caracterización y variación espacial de parámetros fisicoquímicos y del plancton en un río urbano contaminado (río Reconquista, Argentina). *Rev. Int. Contam. Ambie. 14*, 69-77.

Centellas. (2018).

Chapman, D. (1996). Water Quality Assessments- A guide to use of Biota, Sediments and Water in Envirommental Monitoring 2a. ed. *UNESCO/WHO/UNEP*, 626 pp.

De la Barra, N. (09 de Septiembre de 2019). La laguna Alalay lucha por sobrevivir y espera el plan que promete recuperarla. *Los Tiempos Especial Digital*.

EPA. (20 de 08 de 2020). *Lake access* . Obtenido de Exploring real-time and historical lake data: https://www.lakeaccess.org/russ/turbidity.htm?fbclid=IwAR3Ohl6X1DVQt1CC5tRvYP_xFkjCCjnMZtF7Z2sjUCs35TBhk5vvS9RwPX4

FAO. (2014). *Food and Agriculture Organization* .

Ford, A. (1997). System dynamics and the electric power industry. *System Dinamics Review 13 (1)*, 57-85.

Ford, D. N., & Sterman, J. D. (1998). Dynamic modelling of product development processes. *System Dynamics Review 14 (1)*, 31-68.

Ginovart, M., Catalina, M., & Blanco, M. (2012). Modelización y Simulación Discreta con la Plataforma NetLogo: ¿Por que caen las hojas en Otoño? *Congreso Internacional de Docencia Universitaria i Innovacion: Barcelona.* Barcelona, Spain.

HAMC, H. A. (23 de 09 de 2012). *PROYECTO INTEGRAL: "Laguna Alalay".* Obtenido de Proyectos Medio Ambiente: http://www.cochabamba.gob.bo/public/docs/medioambiente/proyectos/proy_laguna_alalay..pdf [fecha de consulta: 23 de septiembre de 2012].

Hanson, M. A., & Butler, M. G. (1994). Responses of plankton, turbidity and macrophytes to biomanipulation in a shallow prairie lake. *Can. J Fish Aquat Sci. 51*, 1180-1188.

IDEAM. (2007). *Instituto de Hidrologia y Meteorologia y Estudios Ambientales.* Bogota, Colombia: Subdireccion de hidrologia.

Izquierdo, L. R., Galán, J. M., Santos, J. I., & Del Olmo, R. (2008). Modelado de sistemas complejos mediante simulacion basada en agentes y mediante dinamica de sistemas. *EMPIRIA Revista de metodologia y Ciencias Sociales 16* , 101.

Izquierdo, L. R., Galán, J. M., Santos, J. I., & Del Olmo, R. (2008). Modelizacion de sistemas complejos mediante simulacion basada en agentes y mediante dinamica de sistemas. *EMPIRIA*, 85-112.

Jill y colab. (2003).

Jurgens, K., & Stolpe, G. (1995). Seasonal dynamics of crustacean zooplankton, heterotrophic nanoflagellates and bacteria in a shallow, eutrophic lake. *Freshw. Biol. 33*, 27-38.

Lampert, W., & Rothhaupt, K. (1991). Alternating dynamics of rotifers and Daphnia magna in a shallow lake. *Arch. Hydrobiol 120*, 447-456.

Ley 1333. (1992). *Reglamentacion de la Ley del Medio Ambiente.* Bolivia.

Liu, J., Dietz, T., Carpenter, Alberti, M., Folke, C., Moran, E., . . . Taylor, W. W. (2007). Complexity of coupled human and natural system. *Science 317*, 1513-1516.

Lopez Cortés, D., Lizarraga, I., Bustillos, & Rodriguez & Murillo. (2003). Variabilidad del estado trofico y la biomasa del fitoplacton de Bahía Concepción,. *Hidrologia 13 (3)*, 195-206.

Los Tiempos. (06 de 11 de 2016, 2018). La contaminacion gana en la laguna Alalay.

Luecke, C., Vanni, M. J., Magnuson, J. J., & Kitchell, J. K. (1990). Seasonal regulation of Daphnia populations by planktivorous fish implications for the spring clear-water phase. *Limnol Oceanogr 35*, 1718-1733.

M, C. (2003). *Modelos matematicos de eutrofizacion utilizados como herramientas de manejo para la recuperacion de cuerpos de agua.* Tesina presentada a la Escuela de Graduados de la Universidad de Concepcion Diplomado en Analisis y Gestion Ambiental.

Maldonado, Van Damme, & Rojas. (1998). Contaminacion y Eutrofizacion en la Cuenca del Río Rocha (Cochabamba). *Boletin de Ecologia 3*, 3-9.

Meneses, J. L. (1997). Estructura de las comunidades de cladóceros en la Laguna Alalay. 1. Obtenido de http://www.cedsip.org/PDFs/3_2meneses.pdf [fecha de consulta: 06 de agosto de 2012]

Montes de Oca, I. (2001). *Enciclopedia Geografica de Bolivia.* La Paz: Edobol.

Morales, E. A., Rivera, S. F., Ayala, R., & Acosta, F. (2011). *Ocurrencia de Cyclotella meduanae Germain (Bacillariophyta) en la laguna Alalay, un cuerpo de agua salobre y eutrofico (Cochabamba, Bolivia).* Herbario Criptogamico, Universidad Ctolica Boliviana "San Pablo" ; Unidad de Limnología y Recursos Acuaticos (ULRA), Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia.

Morales, E. A., Rivera, S. F., Vildozo, L. H., & Pol, A. (2017). Floracion algal nociva (FAN) producida por cianobacterias en la laguna Alalay, Cochabamba, Bolivia. *Acta Nova; Vol. 8 Universidad Catolica Boliviana San Pablo*, 50-57.

Morales, E. A., Rivera, S. F., Wetzel, C. E., Hamilton, P. B., Bicudo, D. C., Amils, P. R., & Ector, L. (2015). Hipótesis: la agrupacion Microcystis aeruginosa Kütz-Nitzschia palea (Kütz) W. Sm.-bacterias en la laguna Alalay, Cochabamba Bolvia es de tipo simbiotico. *Acta Nova 7*, 120-140.

Morales, E. A., Rivera, S. F., Wetzel, C. E., Hamilton, P. B., Houk, V., & Ector, L. (2017). A New centric diatom belonging to the Cyclotella meneghiniana Kutz. species complex (Bacillariophyta): Cyclotella longirimoportulata from Alalay Pond. *Nova Hedwigla, Belheft 146*, 73-87.

Morales, E., & Rivera, S. (2012). Choice of macrophyte substrate in the use of diatoms as indicator of pond water quality assessment preliminary data on the case of Alalay Pond. *Lakes, Reservoirs and Ponds 6*, 20-42.

Morales, E., & Rivera, S. (2013). *Macrófitas poco frecuentes o desconocidad de la laguna Alalay, Cochabamba,Bolivia.* Herbario Criptogamico Universidad Catolica Boliviana "San Pablo", Carrera de Ingenieria Ambiental, Cochabamba.

Morales, E., & Trainor, F. (1996). Phytoplankton Comunity of Alalay Pond. *The Korean Journal of Phycology*.

Moss, B. (1998). *Shallow lakes: Biomanipulation and eutrophication.* Scope Newsletter 29.

Municipio de Cercado. (2015).

MVOTMA. (2016). *Ministerio de Vivienda Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente*. Obtenido de https://www.dinama.gub.uy/indicadores_ambientales/ficha/oan-concentracion-de-fosforo-total/#:~:text=El%20f%C3%B3sforo%20constituye%20en%20muchos,estado%20tr%C3%B3fico%20de%20los%20mismos.&text=La%20descomposici%C3%B3n%20de%20la%20materia,nutrientes%2C%20p

National Research Council. (2000). *Clean Coastal Waters: Understanding and Reducing the Nutrient Pollution.* Washington, DC: National Academy Press.

Navarro, G., & Maldonado. (2005). *Geografia Ecologica de Bolivia Vegetacion y Ambientes Acuaticos.* Cochabamba, Bolivia: Centro de Ecologia Simon I. Patiño.

Nieto Zuñiga, C. J. (2014). *Distribucion Estratificada de la Demanda Bioquimica de Oxigeno en la Laguna Alalay.* Universidad Mayor de San Simón, Centro de Levantamientos Aeroespaciales y Aplicaciones SIG para el desarrollo Sostenible de los Recursos Naturales, Cochabamba, Bolivia.

Observatorio de Sostenibilidad de España OSE. (2007). *El agua en España: Evaluacion mediante indicadores, indicador: Contaminacion organica (DBO5).* Obtenido de

http://www.sostenibilidad-es.org/sites/default/files/4.1.3.14._contaminacion_organica_dbo5.pdf

Opinion. (20 de 11 de 2013,2016). El numero de aves y anfibios disminuyo de miles a decenas en dos decadas Alalay. *Periodico Opinion*.

Opinion. (20 de 11 de 2016). *El numero de aves y anfibios disminuyo de miles a decenas en dos decadas*, págs. 1-5.

Pérez, M. (2005). *Especiación de metales pesados en sedimentos de la laguna Alalay*. Tesis de Maestria en Ingenieria Ambiental Universidad Mayor de San Simón, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba.

Pita Merino, L. (2014). *Implementacion de un modelo dinamico simplificado y analisis de la sostenibilidad sobre el caso del turismo en las Islas Galapagos.* Barcelona, España: Universidad Politecnica de Cataluña.

Real Academia Española, R. (2019). *Diccionario de la lengua española*. Madrid, España: 22.ª ed.

Restall, J., Jackson, A., Corbett, B., Hughes, L., Richards, R., Tomlinson, R. B., & Cream, F. (2013). Site Investigations for Design of an Open Water Dive Attraction off the Gold Coast. *Reseachgate*, 5-6.

Reynolds, C. S. (1984). The ecology of freshwater phytoplankton. *Cambridge Univ. Press*.

Rosas Casals, M. (2019). *Equation modellig "Definitions and Characteristics of dynamical system" (Catastrophic shift).* Universidad Politecnica de Cataluña, Sustainability Measurement and Modelling - ICREA Universitat Pompeu Fabra, Barcelona, Spain.

Rosas Casals, M. (2019). *Equation modelling "Fundamentals of Mathematical and Systems Thinking on Sustainability".* Univesdidad Politecnica de Cataluña, Sustainability Measurement and Modelling , Barcelona, Spain.

Rudstam, L. G., Lathrop, R. C., & Carpenter, S. R. (1993). The rise and fall of a dominant planktivore: direct and indirect effects on zooplankton. *Ecology 74*, 303-319.

Sarnelle, O. (1993). Herbivore effects on phytoplankton succession in a eutrophic lake. *Ecol. Monogr. 63*, 129-149.

Sawyer, C. N., & McCarty. (1978). Chemestry for Environmental Engeneering . En McGrawHill. New York: McGrawhill Book Company.

Scheffer, M. (1985).

Scheffer, M. (1989). Alternative stable States in Eutrophic, shallow freshwater system: a minimal model. *Hydrobiol Bull 23*, 73-83.

Scheffer, M. (1990). Multiplicity of stables states in freshwater systems. *Hydrobiologia 200-2001*, 475-486.

Scheffer, M. (1999). Searching Explanations of Nature in the Mirror World of Math. *Ecology and Society vol. 3, NO. 2 ART.11*.

Scheffer, M., Rinaldi, S., Kuznetsov, A., & Van Nes, E. H. (1997). Seasonal dynamics of Daphnia and algae explaoned as a periodically forced predator-prey system. *Blackwell Publishing on behalf of nordic Society Oikos 80*, 519-532.

Scheffer, M., Rinaldi, S., Kuznetsov, Y. A., & Van Nes, E. H. (1998). Seasonal dynamics of Daphnia and algae explained as a periodically forced predator-prey system. *Oikos numero 80*, 519-532.

SENAMHI. (2019). *Servicio Nacional de Meteorologia e Hidrologia*. Obtenido de http://senamhi.gob.bo/index.php/inicio

Sommer, U., Gliwiez, Z. M., Lampert, W., & Duncan, A. (1986). The Plankton Ecology Group model of seasonal succession of planktonicevents in fersh waters. *Arch. Hydrobiol 106*, 433-472.

Steinitz y Kannan. (2017).

Steinitz, & Kannan. (2017). *Lakes of Ecuador: Sentinels of Global Climate Change.* Nothern Kentuchy University.

Townsend, D. W., Cammen, L. M., Holligan, P. M., Campbell, D. E., & Pettigrew, N. R. (1994). Causes and consequences of variability in the timing of spring phytoplankton blooms. *Deep-Sea Res. Part A Oceanogr. Res. Pap 41*, 747-765.

UCM, U. C. (14 de 02 de 2015). Descripción de indicadores. 1-4.

USGS. (15 de 12 de 2016). *Science for a changing world Oregon water Science Center*. Obtenido de https://or.water.usgs.gov/will_morrison/secchi_depth_model.html?fbclid=IwAR1CGD7Aax_65mvFB42JlfP3Fh4AXhRD-TAwVY7b_uHqC7rRrYnONeAQXyo

Van Damme, P., Romero, A., Goitia, E., Rojas, J., Cadima, M., Arce, O., & Romero, M. (1997). *Evaluacion de estrategias actuales y alternativas para la recuperacion de la laguna Alalay.* Cochabamba: Centro de Medio Ambiente y Recursos Renovables CEMAR, Universidad Mayor de San Simón.

Vargas Canedo, F. A. (2016). *Investigacion Urbanistica de la laguna Alalay.* Universidad Mayor de San Simón (UMSS), Instituto de Investigacion de Arquitectura, Cochabamba, Bolivia.

Vyhnálek, V. (1989). Growth rates of phytoplankton populations in Rimov reservoir (Czechoslovakia) during the spring clear-water phase. *Ergeb. Limnol*, 435-444.

Wetzel, R. G. (2001). Limnology. Lake and river ecosystems. *Elesevier, Academic Press Third Ed.*, 1006 p.

Wilensky, U. (2012). *Netlogo User Manual. What is NetLogo?* Obtenido de http://ccl.northwestern.edu/netlogo/

Zouiten, H. (2012). *Analisis Mediante Modelado Avanzado de Procesos de Eutrofizacion en Lagunas Litorales: Aplicacion a Masas de Agua Atlanticas y Mediterraneas.* Santander: Tesis Doctoral, Univerisad de Cantabria, Departamento de Ciencias y Tecnicas del Agua y el Medio Ambiente.

## 12. Anexos

*Anexos 1. Ley del medio ambiente 1333*

*Bolivia: Ley N° 2867, 1 de octubre de 2004*

Lexivox, portal jurídico libre

# Bolivia: Ley Nº 2867, 1 de octubre de 2004

CARLOS D. MESA GISBERT
PRESIDENTE CONSTITUCIONAL DE LA REPÚBLICA
Por cuanto, el Honorable Congreso Nacional, ha sancionado la siguiente Ley:
El HONORABLE CONGRESO NACIONAL,
DECRETA:

**Artículo 1°.-** Declárase de prioridad regional, la protección y conservación de la Laguna de Alalay, como Patrimonio Natural y Ecológico del Municipio de Cercado.

**Artículo 2°.-** La Prefectura del Departamento de Cochabamba, el Gobierno Municipal de Cercado, las Universidades de San Simón y Católica, quedan encargadas del cumplimiento de la presente Ley.

---

Remítase al Poder Ejecutivo, para fines Constitucionales.
Es dada en la Sala de Sesiones del Honorable Congreso Nacional, a los quince días del mes de Septiembre de dos mil cuatro años.
Fdo. Mario Diego Justiniano Aponte Presidente en Ejercicio H. Senado Nacional, Mario Cossío Cortez, Juan Luis Choque Armijo, Marcelo Aramayo Pérez, Erick Reyes Villa B., Ernesto Poppe Murillo.
Por tanto, la promulgo para que se tenga y cumpla como Ley de la República.
Palacio de Gobierno de la ciudad de La Paz, al primer día del mes de octubre de dos mil cuatro años.
Fdo. CARLOS D. MESA GISBERT, José Antonio Galindo Neder.

*Anexos 2. Ley 1333 recuperación, mejora y preservación de la laguna Alalay*

*Bolivia: Ley Nº 3745, 24 de septiembre de 2007*

Lexivox, portal jurídico libre

# Bolivia: Ley Nº 3745, 24 de septiembre de 2007

EVO MORALES AYMA
PRESIDENTE CONSTITUCIONAL DE LA REPÚBLICA
Por cuanto, el Honorable Congreso Nacional, ha sancionado la siguiente Ley:
El HONORABLE CONGRESO NACIONAL,
DECRETA:

**Artículo 1°.- (Objeto)** La presente ley tiene por objeto generar el marco jurídico para la toma de acciones de las principales instituciones involucradas en el desarrollo y medio ambiente que permitan la Recuperación, Mejoramiento y Preservación de la La guna Alalay del Departamento de Cochabamba.

**Artículo 2°.- (Comité de Recuperación, Mejoramiento y Preservación de la Laguna Alalay)** Se crea el Comité de Recuperación, Mejoramiento y Preservación de la Laguna Alalay, que tendrá las siguientes responsabilidades:

a) Elaborar y aprobar un Plan inmediato y a largo plazo para la Recuperación, Mejoramiento y Preservación de la Laguna Alalay;
b) Requerir la asignación de recursos económicos necesarios para la ejecución del Plan inmediato y a largo plazo para la Recuperación, Mejoramiento y Preservación de la Laguna Alalay;
c) Aprobar las políticas de manejo de la Laguna Alalay y de su entorno.
d) Ejecutar, a través del Gobierno Municipal de Cochabamba, el Plan inmediato y a largo plazo para la Recuperación, Mejoramiento y Preservación de la Laguna Alalay;
e) Regular el uso de la Laguna Alalay y de su entorno; y,
f) Denunciar cualquier violación a las normas de la Ley de Medio Ambiente y la presente norma jurídica.

**Artículo 3°.- (Miembros del Comité de Recuperación, Mejoramiento y Pre servación de la Laguna Alalay)** El Comité de Recuperación, Mejoramiento y Preser vación de la Laguna Alalay, estará compuesto por representantes de las siguientes instituciones.

a) El Gobierno Municipal de Cochabamba, cuyo representante presidirá el Co mité de Recuperación y Preservación.
b) La Prefectura del Departamento de Cochabamba;
c) La Universidad Mayor de San Simón (UMSS);
d) El Servicio Municipal de Agua Potable y Alcantarillado (SEMAPA);
e) El Ministerio de Desarrollo Rural, Agropecuario y Medio Ambiente;

f) El Ministerio del Agua:
g) Un representante de las Organizaciones Territoriales de Base (OTBs) de los Distritos Municipales que se encuentran en la zona Sud; y,
h) Un, representante de CODEMA (Consejo Departamental de Medio Ambiente

Los máximos ejecutivos de las instituciones descritas deberán designar a sus representantes dentro de los 20 días siguientes a la publicación de la presente Ley, bajo sanción de responsabilidad administrativa y ejecutiva.

**Artículo 4°.- (Responsabilidad Operativa)** El Gobierno Municipal de Cocha-bamba se constituye en la Unidad Operativa del Comité de Recuperación, Mejoramien to y Preservación de la Laguna Alalay.

El Gobierno Municipal de Cochabamba deberá contratar al Coordinador Gene ral del referido Comité. El nombre de la persona que ocupará ese cargo será determina-do por la decisión de la mayoria absoluta de los miembros del Comité de Recuperación, Mejoramiento y Preservación de la Laguna Alalay, previo concurso público de méritos.

**Artículo 5°.- (Asignación de Recursos Económicos)** Las Entidades Públicas que forman parte del Comité de Recuperación, Mejoramiento y Preservación de la La guna Alalay, bajo el concepto de inversión concurrente, deberán asignar prioritariamen te recursos económicos para la ejecución del Plan inmediato y a largo plazo que apro barán.

**Artículo 6°.- (Financiamiento Externo)** El Comité de Recuperación, Mejora-miento y Preservación de la Laguna Alalay, a través del Gobierno Municipal de Cocha-bamba, queda encargado de la búsqueda de financiamiento externo que permita la elaboración de un plan a largo plazo de mejoramiento y preservación.

**Artículo 7°.-** Los actos de disposición o cualquier otro que implique el cambio de uso natural de los predios circundantes que forman parte de la Laguna, deberán previa-mente ser autorizados por el Comité de Recuperación, Mejoramiento y Preservación de la Laguna Alalay.

*Anexos 3. Límites máximos admisibles de parámetros en cuerpos receptores Legislación Boliviana 1333*

LIMITES MAXIMOS ADMISIBLES DE PARAMETROS EN CUERPOS RECEPTORES

ARTÍCULO 1° Los límites de calidad de las clases A,B,C, y D, de cuerpos receptores, en que se han clasificado los cuerpos de agua, se presentan en el Cuadro No. A – 1.

ARTÍCULO 2° Las muestras para control de las descargas de las industrias deberán ser tomadas a la salida de las plantas de tratamiento, inmediatamente después del aforador de descargas, y las destinadas al control de la dilución en el cuerpo receptor, a una distancia entre 50 y 100 m. Del punto de descarga y dentro del cuerpo receptor.

ARTÍCULO 3° La mezcla de agua producto de una descarga y del río, debe regirse por la ecuación (1). Para cualquier parámetro de calidad, el valor total de la mezcla debe ser siempre menor que le establecimiento para la clase del río que corresponda.

$$Pxt = \frac{Px1\ Q1 + PxiQr}{Q1 + Qr} \qquad (1)$$

Donde:

Pxf = parámetro de mezcla

Pxi = parámetro de la descarga

Pxr = parámetro del río, en el punto sin impacto

Qi = caudal de la descarga

Qr = caudal del r

CUADRO N° 1

## CLASIFICACIÓN DE LOS CUERPOS DE AGUA SEGÚN SU APTITUD DE USO

| Orden | Usos | Clase A | Clase B | Clase C | Clase D |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Para abastecimiento doméstico de agua potable después de: | | | | |
| | a) sólo una desinfección y ningún tratamiento. | SI | NO | NO | No |
| | b) Tratamiento solamente físico y desinfección | No necesario | SI | NO | No |
| | c) Tratamiento físico – químico, completo: coagulación, floculación, filtración y desinfección. | No necesario | | SI | NO |
| | d) Almacenamiento prolongado o presedimentación, seguidos de tratamiento, al igual que c). | No necesario | No necesario | No necesario | SI |
| 2 | Para recreación de contacto primario: natación, Esquí, inmersión. | SI | SI | SI | NO |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | Para protección de los recursos hidrobiológicos | | | | |
| 3 | | SI | SI | SI | NO |
| | Para riego de hortalizas consumidas crudas y frutas | | | | |
| 4 | de cáscaras delgada, que sean ingeridas crudas sin remoción de ella. | SI | SI | NO | NO |
| | Para abastecimiento industrial | | | | |
| 5 | Para la cría natural y/o intensiva (acuicultura) de especies destinadas a la alimentación humana | SI | SI | SI | SI |
| 6 | Para abrevadero de animales | SI | SI | SI | NO |
| 7 | Para la navegación | NO(*) | SI | SI | NO |
| 8 | | NO(**) | SI | SI | SI |

CUADRO N° A-1 VALORES MAXIMOS ADMISIBLES DE PARÁMETROS EN CUERPOS RECEPTORES

| N° | PARAMETROS | UNIDAD | CANCERIGENOS | CLASE "A" | CLASE "B" | CLASE "C" | CLASE "D" |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| 1 | PH | | NO | 6.0 a 8.5 | 6.0 a 9.0 | 6.0 a 6.9.0 | 6.0 a 9.0 |
| 2 | Temperatura | .C | | +/-3°C de C receptor | +/-3°C de C receptor | +/-3°C de C receptor | +/-3°C de C receptor |
| 3 | Sólidos disueltos totales; | mg/l | | 1000 | 1000 | 1500 | 1500 |
| 4 | Aceites y Grasas; | mg/l | NO | Ausentes | Ausente | 0.3 | 1 |
| 5 | DBO5 | mg/l | NO | <2 | <5 | <20 | <30 |
| 6 | DQO | mg/l | NO | <5 | <10 | <40 | <60 |
| 7 | NMP Colifecales NMP | N/100ml | NO | <50 y <5 en 80% muestras | <1000y<200 en 80% de muestras | <5000y<1000 en 80% de muestras | <50000y<5000en 80% de muestras |
| 8 | Parámetros | N/l | | <1 | <1 | <1 | <1 |
| 9 | Color mg Pt/1 | mg/l | NO | <10 | <50 | <100 | <200 |
| 10 | Oxígeno disuelto | mg/l | NO | >80% sat. | >70% sat. | >60% sat | >50% sat |
| 11 | Turbidez | UNT | NO | <10 | | | |

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 12 | Sólidos sedimentables | mg/l – ml/l | NO | <10 mg/l | <50 | <100 <2000*** | <200 – 10000*** |
| 13 | Aluminio | mg/l | | 0.2 c. Al | <30 mg/l -0.1ml/l | <50mg/l -<1ml/l | 100 - <1ml/l |
| 14 | Amoníaco | mg/l | NO | 0.05 c. NH3 | 0.5 c. Al | 1.0 c. Al | 1.0 c. Al |
| 15 | Antimonio | mg/l | NO | 0.01 c. Sb | 1.0 c.NH3 | 2 c. NH3 | 4 c. NH3 |
| 16 | Arsénico total | mg/l | SI | 0.05 c. As | 0.01 c. Sb | 0.01 c. Sb | 0.01 c. Sb |
| 17 | Benceno | ug/l | SI | 2.0 c. Be | 0.05 c. As | 0.05 c. As | 0.1 c. As |
| 18 | Bario | mg/l | NO | 1.0 0.05 c. Ba | 6.0 c. Be | 10.0 c. Be | 10.0 |
| 19 | Berilio | mg/l | SI | 0.001 c. B | 1.0 c. Ba | 2.0 c. Ba | 5.0 c. Ba |
| 20 | Boro | mg/l | | 1.0 c. B | 0.001 c. Be | 0.001 c. Be | 0.001 c. Be |
| 21 | Calcio | mg/l | NO | 200 | 1.0 c. B | 1.0 c. B | 1.0 c. B |
| 22 | Cadmio | mg/l | NO | 0.005 | 300 | 300 | 400 |
| 23 | Cianuros | mg/l | NO | 0.02 | 0.005 | 0.005 | 0.005 |
| 24 | Cloruros | mg/l | NO | 250 c. Cl | 0.1 | 0.2 | 0.2 |
| 25 | Cobre | mg/l | NO | 0.05 c. Cu | 300 c. Cl | 400 c. Cl | 500 c. Cl |
| 26 | Cobalto | mg/l | | 0.1 c. Co | 1.0 c. Cu | 1.0 c. Cu | 1.0 c.Cu |
| 27 | Cromo Hexavalente | mg/l | SI | 0.05 c. Cr total | 0.2 c. Co | 0.2 c. Co | 0.2 c. Co |
| 28 | Cromo Trivalente | mg/l | NO | | 0.05 c. Cr+6 | 0.05 c. Cr+6 | 0.05 c. Cr + 6 |

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 29 | 1.2 Dicloroeteno | ug/l | SI | 10.0 | 0.6 c. Cr+3 | 0.6 c. Cr+3 | 1.1 c. Cr +3 |
| 30 | 1.1 Dicloroetano | ug/l | SI | 0.3 | 10.0 | 10.0 | 10.0 |
| 31 | Estaño | mg/l | NO | 2.0 c. Sn | 0.3 | 0.3 | 0.3 |
| 32 | Fenoles | ug/l | NO | 1c. C6H5OH | 2.0 c. Sn | 2.0 c. Sn | 2.0 c. Sn |
| 33 | Fierro Soluble | mg/l | NO | 0.3 c. Fe | 1 c. C6H5OH | 5 c. C6H5OH | 10 c. C6H5OH |
| 34 | Fluoruros | mg/l | NO | 0.6 –1.7 c. F | 0.3 c. Fe | 1.0 c. Fe | 1.0 c. Fe |
| 35 | Fostato Total | mg/l | NO | 0.4 c. Orthofosf. | 0.6 - 1.7 c. F | 0.6 – 1.7 c. F | 0.6-1.7 c. F |
| 36 | Magnesio | mg/l | NO | 100 c. Mg | 0.5 c. Orthofosf. | 1.0 c. Orthofosf | 1.0 c. Orthofosf |
| 37 | Manganeso | mg/l | NO | 0.5 c. Mn | 100 c. Mg | 150 c. Mg | 150 c. Mg |
| 38 | Mercurio | mg/l | NO | 0.001 Hg | 1.0 c. Mn | 1.0 c. Mn | 1.0 c. Mn |
| 39 | Litio | mg/l | | 2.5 c. Li | 0.001 Hg | 0.001Hg | 0.001 Hg |
| 40 | Níquel | mg/l | SI | 0.05 c. Ni | 2.5 c. Li | 2.5 c.Li | 5 c. Li |
| 41 | Nitrato | mg/l | NO | 20.0 c. N03 | 0.05 c. Ni | 0.5 c. Ni | 0.5 c. Ni |
| 42 | Nitrito | mg/l | NO | <1.0 c.N | 50.0 c. N03 | 50.0 c. N03 | 50.0 c. N03 |
| 43 | Nitrógeno Total | mg/l | NO | 5 c. N | 1.0 c. N | 1.0 c. N | 1.0 c. N |
| | | | | | 12 c. N | 12 c. N | 12 c. N |

*Anexos 4. Tabla de conversión de unidades de turbidez*

| Fecha | Transparencia [cm] | Transparencia [ft] | Turbidez [FNU] |
|---|---|---|---|
| 01/06/2003 | 15,00 | 0,49 | 134,5 |
| 01/07/2003 | 15,00 | 0,49 | 134,5 |
| 01/08/2003 | 16,00 | 0,52 | 122,5 |
| 01/09/2003 | 16,00 | 0,52 | 122,5 |
| 01/10/2003 | 12,00 | 0,39 | 192,5 |
| 01/11/2003 | 10,00 | 0,33 | 250,2 |
| 01/12/2003 | 11,00 | 0,36 | 218,25 |
| 01/01/2004 | 12,00 | 0,39 | 192,5 |
| 01/02/2004 | 23,00 | 0,75 | 68,95 |
| 01/03/2004 | 21,00 | 0,69 | 78,59 |
| 01/04/2004 | 21,00 | 0,69 | 78,59 |
| 01/05/2004 | 25,00 | 0,82 | 59,94 |
| 01/06/2004 | 23,00 | 0,75 | 68,95 |
| 01/07/2004 | 17,00 | 0,56 | 109,08 |
| 01/08/2004 | 24,00 | 0,79 | 63,55 |
| 01/09/2004 | 24,00 | 0,79 | 63,55 |
| 01/10/2004 | 16,00 | 0,52 | 122,5 |
| 01/11/2004 | 19,00 | 0,62 | 92,97 |
| 01/12/2004 | 25,00 | 0,82 | 59,94 |
| 01/01/2005 | 18,00 | 0,59 | 100,49 |
| 01/02/2005 | 19,00 | 0,62 | 92,97 |
| 01/03/2005 | 23,00 | 0,75 | 68,95 |
| 01/04/2005 | 34,00 | 1,12 | 36,74 |
| 01/05/2005 | 34,00 | 1,12 | 36,74 |
| 01/07/2005 | 39,00 | 1,28 | 29,79 |
| 01/08/2005 | 30,00 | 0,98 | 45,31 |
| 01/09/2005 | 37,00 | 1,21 | 32,54 |
| 01/10/2005 | 24,00 | 0,79 | 63,55 |
| 01/11/2005 | 26,00 | 0,85 | 56,65 |
| 01/12/2005 | 21,00 | 0,69 | 78,59 |
| 01/01/2006 | 17,00 | 0,56 | 109,08 |
| 01/02/2006 | 35,00 | 1,15 | 35,25 |
| 01/03/2006 | 27,00 | 0,89 | 52,71 |
| 01/04/2006 | 36,00 | 1,18 | 33,85 |
| 01/05/2006 | 37,00 | 1,21 | 32,54 |
| 01/06/2006 | 72,00 | 2,36 | 11,4 |
| 01/09/2006 | 36,00 | 1,18 | 33,85 |
| 01/10/2006 | 38,00 | 1,25 | 30,92 |
| 01/11/2006 | 34,00 | 1,12 | 36,74 |
| 01/12/2006 | 40,00 | 1,31 | 28,73 |
| 01/01/2007 | 31,00 | 1,02 | 42,55 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| 01/02/2007 | 37,00 | 1,21 | 32,54 |
| 01/09/2007 | 29,00 | 0,95 | 47,58 |
| 01/10/2007 | 24,00 | 0,79 | 63,55 |
| 01/12/2007 | 20,00 | 0,66 | 84,28 |
| 01/01/2008 | 19,00 | 0,62 | 92,97 |
| 01/02/2008 | 35,00 | 1,15 | 35,25 |
| 01/03/2008 | 56,00 | 1,84 | 16,85 |
| 01/09/2009 | 67,00 | 2,20 | 12,73 |
| 01/08/2009 | 86,00 | 2,82 | 8,62 |
| 01/10/2009 | 90,00 | 2,95 | 8,03 |
| 01/03/2010 | 103,00 | 3,38 | 6,49 |
| 01/06/2010 | 43,00 | 1,41 | 25,59 |
| 01/08/2010 | 67,00 | 2,20 | 12,73 |
| 01/10/2010 | 29,00 | 0,95 | 47,58 |
| 01/12/2010 | 69,00 | 2,26 | 12,2 |
| 01/01/2011 | 101,00 | 3,31 | 6,7 |
| 01/03/2011 | 156,00 | 5,12 | 3,38 |
| 01/04/2011 | 99,00 | 3,25 | 6,89 |
| 01/06/2011 | 99,00 | 3,25 | 6,89 |
| 01/07/2011 | 92,00 | 3,02 | 7,74 |
| 01/08/2011 | 143,00 | 4,69 | 3,88 |
| 01/10/2011 | 53,00 | 1,74 | 18,39 |
| 01/12/2011 | 26,00 | 0,85 | 56,65 |
| 01/02/2012 | 67,00 | 2,20 | 12,73 |
| 01/03/2012 | 85,00 | 2,79 | 8,77 |
| 01/06/2012 | 140,00 | 4,59 | 4,01 |
| 01/08/2012 | 161,00 | 5,28 | 3,22 |
| 01/09/2012 | 86,00 | 2,82 | 8,62 |
| 01/10/2012 | 45,00 | 1,48 | 23,72 |
| 01/11/2012 | 69,00 | 2,26 | 12,2 |
| 01/12/2012 | 26,00 | 0,85 | 56,65 |
| 01/02/2013 | 40,00 | 1,31 | 28,73 |
| 01/04/2013 | 74,00 | 2,43 | 10,89 |
| 01/05/2013 | 58,00 | 1,90 | 16,02 |
| 01/06/2013 | 86,00 | 2,82 | 8,62 |
| 01/08/2013 | 129,00 | 4,23 | 4,56 |
| 01/09/2013 | 102,00 | 3,35 | 6,58 |
| 01/11/2013 | 98,00 | 3,22 | 7 |
| 01/12/2013 | 90,00 | 2,95 | 8,03 |
| 01/02/2014 | 98,00 | 3,22 | 7 |
| 01/03/2014 | 76,00 | 2,49 | 10,48 |
| 01/04/2014 | 87,00 | 2,85 | 8,48 |
| 01/06/2014 | 49,00 | 1,61 | 20,78 |
| 01/08/2014 | 33,00 | 1,08 | 38,9 |
| 01/10/2014 | 44,00 | 1,44 | 24,76 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| 01/11/2014 | 44,00 | 1,44 | 24,76 |
| 01/12/2014 | 74,00 | 2,43 | 10,89 |
| 01/02/2015 | 146,00 | 4,79 | 3,75 |
| 01/03/2015 | 96,00 | 3,15 | 7,25 |
| 01/08/2015 | 70,00 | 2,30 | 11,87 |
| 01/09/2015 | 101,00 | 3,31 | 6,7 |
| 01/11/2015 | 56,00 | 1,84 | 16,85 |
| 01/12/2015 | 54,00 | 1,77 | 17,91 |
| 01/02/2016 | 9,00 | 0,30 | 290,58 |
| 01/03/2016 | 10,00 | 0,33 | 250,19 |
| 01/04/2016 | 17,00 | 0,56 | 109,08 |
| 01/05/2016 | 10,00 | 0,33 | 250,19 |
| 01/06/2016 | 7,00 | 0,23 | 440,98 |
| 01/07/2016 | 5,00 | 0,16 | 779,54 |
| 01/08/2016 | 6,00 | 0,20 | 549,17 |
| 01/09/2016 | 3,00 | 0,10 | 1630,34 |
| 01/10/2016 | 3,00 | 0,10 | 1630,34 |
| 01/01/2017 | 7,00 | 0,23 | 440,98 |
| 01/02/2017 | 6,00 | 0,20 | 549,17 |
| 01/03/2017 | 9,00 | 0,30 | 290,58 |

*Anexos 5. Base de datos de la laguna Alalay (Modelo 2)*

| Fecha | Profundidad [cm] | pH | T agua [° C] | Conductividad µS/cm] | Turbidez [FNU] | Nitrógeno total [mg/l] | Fósforo Total [mg/l] | OD [mg/l] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 01/06/2003 | 133,00 | 9,00 | 17,00 | 2256 | 134,5 | 0,00 | 0,00 | 8,00 |
| 01/07/2003 | 132,00 | 9,00 | 17,00 | 2467 | 134,5 | 0,00 | 0,00 | 12,00 |
| 01/08/2003 | 118,00 | 9,00 | 21,00 | 2923 | 122,5 | 0,47 | 2,02 | 7,00 |
| 01/09/2003 | 95,00 | 9,00 | 21,00 | 3517 | 122,5 | 0,28 | 2,05 | 8,00 |
| 01/10/2003 | 89,00 | 9,00 | 20,00 | 4067 | 192,5 | 0,36 | 0,00 | 6,00 |
| 01/11/2003 | 80,00 | 9,00 | 21,00 | 4360 | 250,2 | 1,01 | 1,50 | 6,00 |
| 01/12/2003 | 89,00 | 9,00 | 21,00 | 3700 | 218,25 | 3,01 | 0,00 | 5,00 |
| 01/01/2004 | 260,00 | 8,00 | 21,00 | 1156 | 192,5 | 0,19 | 0,96 | 6,00 |
| 01/03/2004 | 256,00 | 8,00 | 24,00 | 2036 | 78,59 | 0,15 | 0,49 | 4,00 |
| 01/04/2004 | 255,00 | 8,00 | 23,00 | 1242 | 78,59 | 0,00 | 0,00 | 5,00 |
| 01/05/2004 | 259,00 | 8,00 | 19,00 | 1246 | 59,94 | 0,40 | 0,00 | 6,00 |
| 01/06/2004 | 237,00 | 8,00 | 18,00 | 1334 | 68,95 | 0,00 | 0,00 | 6,00 |
| 01/07/2004 | 227,00 | 8,00 | 16,00 | 1456 | 109,08 | 0,66 | 0,38 | 5,00 |
| 01/08/2004 | 209,00 | 8,00 | 20,00 | 1552 | 63,55 | 0,67 | 0,52 | 5,00 |
| 01/09/2004 | 208,00 | 8,00 | 21,00 | 1664 | 63,55 | 0,54 | 0,54 | 6,00 |
| 01/10/2004 | 179,00 | 9,00 | 23,00 | 1762 | 122,5 | 0,38 | 0,22 | 6,00 |
| 01/11/2004 | 175,00 | 9,00 | 22,00 | 1912 | 92,97 | 2,65 | 0,00 | 6,00 |
| 01/12/2004 | 176,00 | 9,00 | 23,00 | 1996 | 59,94 | 2,00 | 0,34 | 5,00 |
| 01/01/2005 | 202,00 | 8,00 | 23,00 | 1650 | 100,49 | 4,15 | 0,44 | 5,00 |
| 01/02/2005 | 298,00 | 8,00 | 22,00 | 1414 | 92,97 | 8,94 | 0,35 | 5,00 |
| 01/03/2005 | 265,00 | 8,00 | 23,00 | 1195 | 68,95 | 9,86 | 0,32 | 3,00 |
| 01/04/2005 | 237,00 | 8,00 | 20,00 | 1201 | 36,74 | 21,93 | 0,52 | 4,00 |
| 01/05/2005 | 239,00 | 8,00 | 17,00 | 1259 | 36,74 | 0,41 | 0,62 | 4,00 |
| 01/07/2005 | 198,00 | 8,00 | 16,00 | 1387 | 29,79 | 0,23 | 1,81 | 6,00 |
| 01/08/2005 | 225,00 | 8,00 | 18,00 | 1468 | 45,31 | 0,45 | 0,51 | 5,00 |
| 01/09/2005 | 196,00 | 9,00 | 19,00 | 1579 | 32,54 | 0,46 | 0,57 | 6,00 |
| 01/10/2005 | 165,00 | 9,00 | 22,00 | 1757 | 63,55 | 0,71 | 0,66 | 6,00 |
| 01/11/2005 | 145,00 | 9,00 | 22,00 | 1869 | 56,65 | 0,77 | 0,54 | 8,00 |
| 01/12/2005 | 110,00 | 9,00 | 25,00 | 1826 | 78,59 | 0,39 | 1,04 | 5,00 |
| 01/01/2006 | 237,00 | 8,00 | 24,00 | 890 | 109,08 | 0,34 | 0,29 | 3,00 |
| 01/02/2006 | 273,00 | 8,00 | 22,00 | 1003 | 35,25 | 0,80 | 0,62 | 4,00 |
| 01/03/2006 | 273,00 | 8,00 | 20,00 | 999 | 52,71 | 0,00 | 0,44 | 2,00 |

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 01/04/2006 | 268,00 | 8,00 | 18,00 | 988 | 33,85 | 0,00 | 0,53 | 2,00 |
| 01/05/2006 | 253,00 | 8,00 | 15,00 | 1033 | 32,54 | 0,00 | 0,00 | 3,00 |
| 01/06/2006 | 224,00 | 8,00 | 15,00 | 1122 | 11,4 | 0,00 | 0,00 | 5,00 |
| 01/09/2006 | 223,00 | 8,00 | 19,00 | 1303 | 33,85 | 0,00 | 0,00 | 4,00 |
| 01/10/2006 | 197,00 | 9,00 | 21,00 | 1407 | 30,92 | 0,00 | 0,00 | 5,00 |
| 01/11/2006 | 184,00 | 9,00 | 20,00 | 1516 | 36,74 | 0,00 | 0,00 | 6,00 |
| 01/12/2006 | 163,00 | 9,00 | 23,00 | 1571 | 28,73 | 0,00 | 0,00 | 6,00 |
| 01/01/2007 | 177,00 | 9,00 | 23,00 | 1594 | 42,55 | 0,00 | 0,00 | 4,00 |
| 01/02/2007 | 216,00 | 9,00 | 24,00 | 1390 | 32,54 | 0,00 | 0,00 | 5,00 |
| 01/10/2007 | 145,00 | 9,00 | 21,00 | 2030 | 63,55 | 1,13 | 0,56 | 6,00 |
| 01/12/2007 | 145,00 | 9,00 | 20,00 | 2021 | 84,28 | 2,14 | 1,62 | 9,00 |
| 01/01/2008 | 243,00 | 9,00 | 21,00 | 1336 | 92,97 | 0,62 | 0,91 | 8,00 |
| 01/02/2008 | 268,00 | 9,00 | 21,00 | 1180 | 35,25 | 0,51 | 1,35 | 7,00 |
| 01/03/2008 | 283,00 | 9,00 | 21,00 | 1136 | 16,85 | 0,00 | 0,00 | 10,00 |
| 01/09/2009 | 258,00 | 7,00 | 15,00 | 1375 | 12,73 | 0,00 | 0,00 | 3,00 |
| 01/08/2009 | 242,00 | 7,00 | 18,00 | 1397 | 8,62 | 0,00 | 0,00 | 4,00 |
| 01/10/2009 | 221,00 | 9,00 | 25,00 | 1725 | 8,03 | 0,00 | 0,00 | 5,00 |
| 01/03/2010 | 250,00 | 8,00 | 22,00 | 1699 | 6,49 | 17,42 | 1,70 | 0,00 |
| 01/06/2010 | 183,00 | 9,00 | 20,00 | 1945 | 25,59 | 3,70 | 0,08 | 18,00 |
| 01/08/2010 | 188,00 | 8,00 | 10,00 | 2103 | 12,73 | 4,04 | 0,07 | 7,00 |
| 01/10/2010 | 141,00 | 9,00 | 22,00 | 2803 | 47,58 | 5,91 | 0,26 | 9,00 |
| 01/12/2010 | 123,00 | 10,00 | 26,00 | 3380 | 12,2 | 2,80 | 0,54 | 7,00 |
| 01/01/2011 | 131,00 | 10,00 | 22,00 | 3140 | 6,7 | 0,46 | 0,93 | 3,00 |
| 01/03/2011 | 305,00 | 10,00 | 22,00 | 978 | 3,38 | 0,21 | 0,72 | 9,00 |
| 01/04/2011 | 263,00 | 8,00 | 21,00 | 1149 | 6,89 | 0,30 | 0,52 | 2,00 |
| 01/06/2011 | 235,00 | 8,00 | 0,00 | 1552 | 6,89 | 0,20 | 0,72 | 2,00 |
| 01/07/2011 | 228,00 | 7,00 | 16,00 | 1258 | 7,74 | 0,02 | 0,67 | 4,00 |
| 01/08/2011 | 219,00 | 8,00 | 17,00 | 1609 | 3,88 | 0,27 | 0,64 | 2,00 |
| 01/10/2011 | 182,00 | 8,00 | 23,00 | 1947 | 18,39 | 1,70 | 0,98 | 5,00 |
| 01/12/2011 | 198,00 | 9,00 | 21,00 | 2210 | 56,65 | 0,85 | 1,10 | 2,00 |
| 01/02/2012 | 254,00 | 9,00 | 21,00 | 1684 | 12,73 | 2,77 | 0,86 | 4,00 |
| 01/03/2012 | 260,00 | 7,00 | 19,00 | 1529 | 8,77 | 3,43 | 0,81 | 2,00 |
| 01/06/2012 | 225,00 | 7,00 | 13,00 | 1439 | 4,01 | 0,41 | 0,08 | 2,00 |
| 01/08/2012 | 215,00 | 7,00 | 16,00 | 1962 | 3,22 | 1,24 | 0,08 | 3,00 |
| 01/09/2012 | 195,00 | 8,00 | 19,00 | 2085 | 8,62 | 0,87 | 0,08 | 1,00 |
| 01/10/2012 | 166,00 | 9,00 | 24,00 | 2480 | 23,72 | 1,98 | 0,45 | 3,00 |

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 01/11/2012 | 157,00 | 8,00 | 27,00 | 2673 | 12,2 | 2,62 | 0,60 | 5,00 |
| 01/12/2012 | 149,00 | 9,00 | 23,00 | 2757 | 56,65 | 0,00 | 0,00 | 9,00 |
| 01/02/2013 | 215,00 | 9,00 | 22,00 | 2207 | 28,73 | 2,08 | 1,95 | 4,00 |
| 01/04/2013 | 198,00 | 9,00 | 22,00 | 2213 | 10,89 | 1,50 | 1,10 | 7,00 |
| 01/05/2013 | 177,00 | 9,00 | 17,00 | 2505 | 16,02 | 0,00 | 0,00 | 8,00 |
| 01/06/2013 | 172,00 | 8,00 | 16,00 | 2260 | 8,62 | 0,70 | 0,84 | 7,00 |
| 01/08/2013 | 170,00 | 10,00 | 20,00 | 2673 | 4,56 | 0,00 | 0,00 | 12,00 |
| 01/09/2013 | 167,00 | 10,00 | 23,00 | 2833 | 6,58 | 0,00 | 0,00 | 11,00 |
| 01/11/2013 | 138,00 | 10,00 | 21,00 | 3323 | 7 | 0,00 | 0,00 | 11,00 |
| 01/12/2013 | 104,00 | 10,00 | 24,00 | 4083 | 8,03 | 0,00 | 0,00 | 6,00 |
| 01/02/2014 | 263,00 | 10,00 | 21,00 | 1716 | 7 | 0,09 | 0,00 | 11,00 |
| 01/03/2014 | 263,00 | 9,00 | 21,00 | 1768 | 10,48 | 0,32 | 1,52 | 6,00 |
| 01/04/2014 | 242,00 | 8,00 | 20,00 | 1917 | 8,48 | 0,57 | 2,75 | 5,00 |
| 01/06/2014 | 231,00 | 9,00 | 17,00 | 2047 | 20,78 | 0,00 | 0,00 | 5,00 |
| 01/08/2014 | 191,00 | 8,00 | 18,00 | 2340 | 38,9 | 0,00 | 0,00 | 7,00 |
| 01/10/2014 | 168,00 | 9,00 | 23,00 | 2710 | 24,76 | 0,00 | 0,00 | 9,00 |
| 01/11/2014 | 159,00 | 10,00 | 23,00 | 2907 | 24,76 | 1,15 | 4,35 | 0,00 |
| 01/12/2014 | 149,00 | 10,00 | 25,00 | 3067 | 10,89 | 0,98 | 1,00 | 9,00 |
| 01/02/2015 | 179,00 | 10,00 | 25,00 | 3437 | 3,75 | 0,78 | 2,33 | 12,00 |
| 01/03/2015 | 169,00 | 10,00 | 20,00 | 2762 | 7,25 | 1,90 | 1,02 | 6,00 |
| 01/08/2015 | 143,00 | 10,00 | 18,00 | 3637 | 11,87 | 0,61 | 0,82 | 8,00 |
| 01/09/2015 | 139,00 | 10,00 | 22,00 | 3883 | 6,7 | 0,21 | 2,40 | 7,00 |
| 01/11/2015 | 100,00 | 9,00 | 23,00 | 5577 | 16,85 | 1,17 | 1,43 | 7,00 |
| 01/12/2015 | 102,00 | 10,00 | 19,00 | 5867 | 17,91 | 1,73 | 4,42 | 2,00 |
| 01/02/2016 | 162,00 | 10,00 | 23,00 | 3460 | 290,58 | 1,70 | 3,78 | 8,00 |
| 01/03/2016 | 136,00 | 9,00 | 20,00 | 3347 | 250,19 | 1,77 | 3,00 | 3,00 |
| 01/04/2016 | 128,00 | 9,00 | 21,00 | 3637 | 109,08 | 2,64 | 4,16 | 6,00 |
| 01/05/2016 | 103,00 | 9,00 | 17,00 | 3857 | 250,19 | 3,20 | 3,65 | 2,00 |
| 01/06/2016 | 87,00 | 9,00 | 14,00 | 4197 | 440,98 | 3,27 | 1,84 | 5,00 |
| 01/07/2016 | 85,00 | 10,00 | 14,00 | 4600 | 779,54 | 5,46 | 3,02 | 2,00 |
| 01/08/2016 | 88,00 | 10,00 | 12,00 | 5027 | 549,17 | 9,25 | 2,75 | 3,00 |
| 01/09/2016 | 53,00 | 10,00 | 20,00 | 5913 | 1630,34 | 7,13 | 3,59 | 3,00 |
| 01/10/2016 | 60,00 | 10,00 | 18,00 | 7533 | 1630,34 | 12,31 | 2,44 | 2,00 |
| 01/01/2017 | 86,00 | 10,00 | 20,00 | 4857 | 440,98 | 0,00 | 0,00 | 1,00 |
| 01/02/2017 | 104,00 | 10,00 | 19,00 | 3797 | 549,17 | 10,24 | 2,74 | 2,00 |
| 01/03/2017 | 165,00 | 10,00 | 19,00 | 2370 | 290,58 | 6,47 | 1,05 | 2,00 |