

## Estudio de la contaminación por metales en el agua del Río San Juan

Carlos Enrique Chirinos Málaga  
cchm7@hotmail.com



<http://www.dinamica-de-sistemas.com/>

Vensim <http://www.atc-innova.com/>



## **INTRODUCCIÓN**

Esta tesina se inicia con una revisión de información referida al cuerpo de agua en estudio, así tenemos que el río San Juan es un tributario importante del río Mantaro y del lago Chinchaycocha, de acuerdo a los Monitoreos de la calidad de agua realizados por la Autoridad Nacional del Agua, actualmente muestra evidencia de contaminación por metales y contaminación, probablemente debido a las fuentes puntuales procedentes de vertimientos municipales y mineros, también debido a fuentes difusas como pasivos ambientales mineros y suelos contaminados, que se vierten o por escorrentías y llegan a impactar las aguas del río San Juan; estos datos muestran que las aguas del río San Juan muestran evidencias de metales pesados principalmente en la parte media y baja de la sub cuenca del río San Juan, siendo el río Ragra uno de sus tributarios y de los que principalmente aporta la carga contaminante al río San Juan.

El presente trabajo toma como modelo de sistema al río San Juan y sus fuentes contaminantes que afectan la calidad del agua de este río, el estudio pretende crear una metodología aplicando la Dinámica de Sistemas, para determinar la concentración de contaminantes de metales pesados en función a su caudal en el agua del Río San Juan, como del río Ragra, así como de los vertimientos de aguas residuales cerca al punto en estudio; se hace notar que cercano al punto en estudio RSjua-3, no se detectaron vertimientos autorizados y no autorizados, y con la finalidad de realizar una simulación más completa de las fuentes contaminantes que pueden afectar a un río, se asumió los valores de concentración de plomo y caudales tanto para vertimientos autorizados que cumplen la norma como a vertimientos no autorizados.

### **1. CAPITULOS DE LA MEMORIA**

#### **2.1. MARCO TEORICO**

La sub cuenca del Río San Juan se encuentra a una altitud promedio de 4.200 m.s.n.m. Su extensión es de 1,171 Km<sup>2</sup> desde su nacimiento hasta la represa que da origen al embalse Upamayo a 4.090 m.s.n.m., se encuentra ubicado en el departamento de Pasco. En la parte central se desarrolla una actividad agrícola-ganadera de la zona. El principal cuerpo de agua se encuentra en la parte más baja de la cuenca, denominado Lago Chinchaycocha, que alcanza una extensión de cerca de 32.000 hectáreas. El río San Juan presenta un régimen pluvial, definido por las épocas de lluvia y de estiaje. En la época de estiaje entre Junio y Noviembre, el caudal del río San Juan se caracteriza por permanecer relativamente estable, las aguas cristalinas del San Juan a la altura de la localidad de Yurajhuanca son captadas como fuente de abastecimiento de agua de consumo de la ciudad de Cerro de Pasco. La Quebrada Quiulacocha es

receptora de las aguas industriales de las compañías Volcán Compañía Minera - Unidad Paragsha y Compañía Minera Aurex S.A., de igual forma es receptora de las aguas residuales domésticas de estas, todas estas aguas van a formar el río Ragra el cual finalmente se vierte en el río San Juan. Las principales fuentes de contaminación identificadas son los vertimientos de las actividades mineras que se encuentran en operación y de los vertimientos de aguas residuales y residuos sólidos de las principales ciudades ubicadas a lo largo del recorrido del río Mantaro. La actividad minera ha generado vertimientos de aguas contaminadas, así como una gran acumulación de relaves y de pasivos ambientales. Dentro de los problemas que presenta esta la contaminación de sus aguas, en las cuales existe la presencia de metales, microorganismos patógenos, generados probablemente por la presencia de vertimientos de aguas residuales poblacionales, mineros y la presencia de pasivos ambientales (Mendoza 2012, 2013).

Según Sierra (2011), Manifiesta que debido a la complejidad de los factores que determinan la calidad del agua y la gran cantidad de variables utilizadas para describir el estado de los cuerpos de agua en términos cuantitativos, es difícil dar una definición simple de "calidad del agua". Señalando que los conocimientos sobre calidad del agua han evolucionado a través del tiempo a medida que ha aumentado su demanda en diferentes usos y han mejorado los métodos para analizar e interpretar sus características; así la calidad en un ambiente acuático se puede definir como una lista de concentraciones, especificaciones y aspectos físicos de sustancias orgánicas e inorgánicas, la composición y el estado de la biota acuática presente, la calidad presenta variaciones espaciales y temporales debido a factores externos e internos al cuerpo de agua.

Simonovic (2002), muestra una tentativa de una modelización mundial de los recursos hídricos utilizando el enfoque de dinámica de sistemas; basándose en el modelo WorldWater que se desarrolla sobre la última versión del modelo world3, el cual intenta representar la continua interacción dinámica entre población humana y los recursos globales iniciales; el modelo contiene numerosas relaciones de retroalimentación que representan a los medios tecnológicos y demográficos para lograr un equilibrio entre el tamaño de la población y el suministro de recursos. Los autores en su artículo concluyen como resultados de las simulaciones en: Primero que el agua es uno de los factores limitantes que necesitan ser considerados en el modelamiento del futuro desarrollo mundial, segundo que la contaminación del agua es el más importante problema futuro a escala global.

El uso de la dinámica de sistemas como una metodología que sirve para abordar problemas complejos en la gestión de los recursos hídricos. La dinámica de sistemas también puede ayudar en los problemas de ordenamiento territorial, la gestión de las cuencas hidrográficas, la gestión del agua urbana, las inundaciones e irrigaciones muestran efectos importantes a corto plazo y a largo plazo, y que son asuntos con alto potencial de conflicto. Se argumenta que la dinámica de sistemas, combinados con participación de los interesados

proporciona una metodología adecuada para abordar estas cuestiones con eficacia, también la simulación dinámica nos permite observar el comportamiento de un sistema modelado y su respuesta a intervenciones en el tiempo, que los modelos de simulación dinámica consisten en ecuaciones que describen el cambio dinámico. Si las condiciones de estado del sistema son conocidas en un momento en el tiempo, el estado del sistema en el siguiente punto en el tiempo puede ser computado. La repetición de este proceso se puede mover a través del tiempo paso a paso en cualquier intervalo deseado; la simulación ayuda a nuestra capacidad de hacer predicciones de estados futuros, el modelo describe la realidad con una cierta precisión, el proceso de modelado y sus resultados se pueden utilizar para mejorar nuestra comprensión del problema. (Winz y Brierley 2007)

## **2.2. MARCO METODOLÓGICO**

El marco metodológico indica cómo se realizara la investigación, el diseño planteado consiste en primer lugar, en recogerlas información provenientes de fuentes primarias las que están conformadas por el análisis de documentos oficiales, como es el caso de los datos del segundo monitoreo de calidad de aguas realizados en el Río San Juan en el año 2013. En segundo lugar se consultaron autores especializados sobre el tema, en este punto tenemos que para crear un modelo de Simulación aplicando la Dinámica de Sistemas se ha utilizado la metodología recomendada por Martín (2003). En tercer lugar, se ha elaborado una metodología mediante el uso de la Dinámica de Sistemas para conocer la concentración de contaminantes de metales pesados, en el agua del Río San Juan y las variables o fuentes que lo afectan directamente.

### **2.2.1. Recopilación de Información**

La información se basó en la recopilación de datos de fuentes contaminantes y monitoreo de calidad de agua realizada en la sub cuenca del río San Juan, en noviembre del 213. Dentro de los datos obtenidos tenemos:

- Los resultados de los análisis de agua realizados se muestra en la Tabla general de resultados del segundo monitoreo realizado el año 2013 por la Autoridad Nacional del Agua, en la sub cuenca del río San Juan (ver anexo A), los datos utilizados para la creación del modelo en Plomo 1 están basados en el 2° monitoreo realizado, los datos de Plomo 2 algunos son asumidos para ver el comportamiento del modelo, los valores se muestran en el cuadro N°1 adjunto.

**Cuadro N°1: Resultado de análisis de agua utilizado.**

Punto de monitoreo	Parámetro medido		Caudal en l/s	Observaciones
	Plomo 1 en mg/l	Plomo 2 en mg/l		
Río San Juan. RSjua-3	0,07	0,03 (*)	1500	Valor promedio. (*) valor asumido.
Río Ragra. RRagr-3	0,05	0,05 (*)	350	Valor asumido. (*)

**Cuadro N°2: Valores de la norma peruana para aguas.**

Norma	Parámetro medido		Caudal en l/s	Observaciones
	Plomo 1 en mg/l	Plomo 2 en mg/l		
Estándares de Calidad Ambiental para Agua- ECA agua	0,05	0,05	1500	Decreto Supremo N°002-2008-MINAM.
Límites Máximos Permisibles.	0,2	0,2	350	Decreto Supremo N°010-2010-MINAM, para efluentes Minero Metalúrgicos.

### **2.2.2. Creación del modelo**

(Martín 2003). Para la creación del modelo se ha considerado las siguientes etapas de importancia:

#### **Definir el Problema.**

Etapla clave para el estudio que se va a realizar, porque delimita el estudio a realizar.

El sistema considerado es el río San Juan y las fuentes que generan una variación en la calidad de sus aguas como son el río Ragra como tributario y los vertimientos autorizados y no autorizados que descargan directamente en el río San Juan; el presente estudio propone un Modelo mediante la aplicación de la Dinámica de Sistemas que permita conocer la concentración en miligramos de metal que presenta un parámetro como el Plomo, en el agua del Río San Juan y las variables o fuentes que lo afectan directamente, y a su vez permita cuantificar su desviación con respecto a la concentración que debería tener la norma peruana de acuerdo a los caudales del río San Juan.

*Para mayor detalle de las variables ver Tabla de Datos y Resultados de las Variables Utilizadas en el Diagrama de Flujo.*

### **Definir las influencias de Primer Orden.**

Son aquellos elementos que se consideran tienen influencia directa con el problema, estos elementos pueden ser cuantitativos o cualitativos, pero que se puedan valorar.

Para este estudio se ha considerado que los elementos que tienen influencia directa con la calidad de agua del río San Juan y por tanto son de primer orden:

- Concentración de ingreso al río San Juan.
- Tributario del río Ragra que se vierte directamente en el río San Juan.
- Vertimiento autorizado-va, que se vierte directamente en el río San Juan, en este caso al no tener el dato en el informe del segundo monitoreo del río San Juan, se ha asumido un valor hipotético de un efluente minero metalúrgico, para ver cómo opera el modelo bajo estas condiciones.
- Vertimiento no autorizado-vna, también se vierte directamente en el río San Juan, en este caso al no tener el dato en el informe del segundo monitoreo del río San Juan, se ha asumido un valor de un efluente minero metalúrgico, para ver cómo opera el modelo bajo estas condiciones.

### **Influencias de Segundo Orden.**

Son aquellos elementos que influyen en los del Primer Orden, no influyen directamente pero lo condicionan decisivamente, entre ellos están:

- Parámetro del río y caudal tanto para el río San Juan como el río Ragra, sus valores son tomados del segundo monitoreo del río San Juan, ambos definen el aporte en concentración de metales (Plomo) que incorporan al río San Juan.
- Parámetro-va y Caudal -va. del efluente autorizado minero metalúrgico sus valores son asumidos, ambos definen el aporte en concentración de metales (Plomo) que presenta este efluente.
- Parámetro-vna y Caudal -vna. del efluente no autorizado minero metalúrgico sus valores son asumidos, ambos definen el aporte en concentración de metales (Plomo) que presenta este efluente.

### **Influencias de Tercer Orden.**

Son aquellos elementos que influyen en los elementos de segundo orden, en nuestro modelo está referido a las normas de calidad de agua en el río (ECA agua) y normas sectoriales en el efluente minero (Imp), los valores considerados se muestran en el Cuadro N°2, no influyen directamente pero lo van a condicionar a reducir su carga contaminante si se sobrepasa la norma, entre ellos tenemos:

- Concentración deseada-cd, en este modelo es la variable que muestra si existe una desviación con respecto a la estimación calculada de la norma ECA agua, si el valor es cero o menor, significa que la concentración del metal pesado (plomo) en el río San Juan es el ideal.
- Parámetro eca agua, valor que viene de la norma ECA agua.

- Caudal –cd, es caudal del rio San Juan.
- Límite máximo permisible – va y Límite máximo permisible – vna, su valor indica si existe una desviación con respecto a la estimación calculada de la norma lmp, si el valor es cero o menor, significa que la concentración del metal pesado (plomo) en el rio San Juan es el ideal.
- .Lmp- va y Lmp- vna, valor establecido en la norma para el parámetro plomo en efluentes minero metalúrgicos.

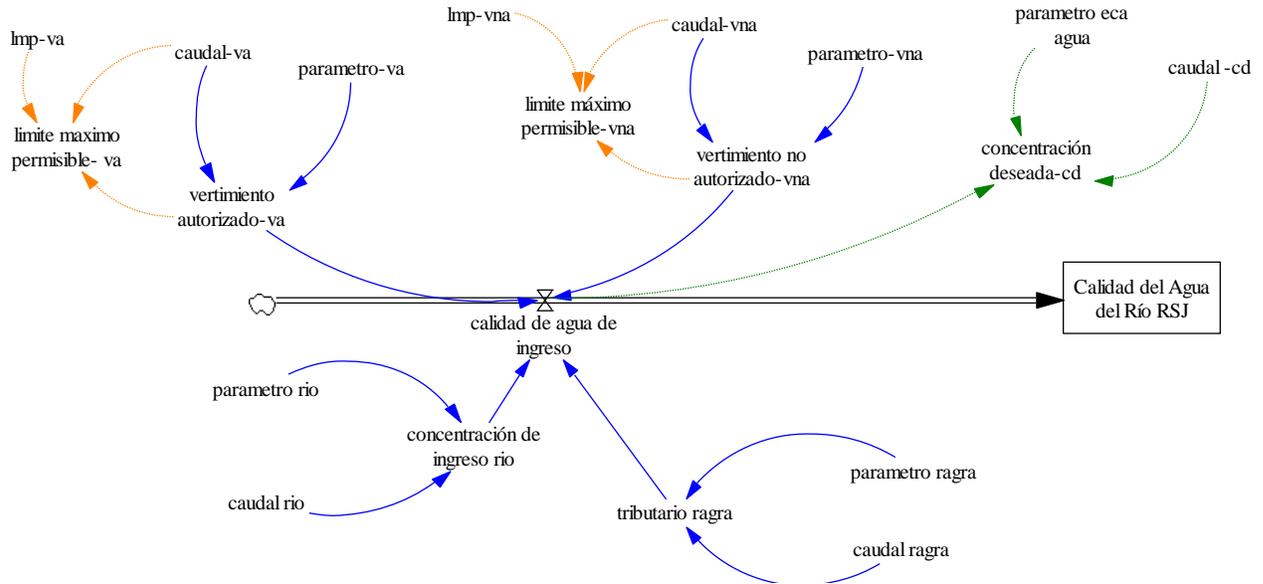
### **Creación del Diagrama de Flujo**

La creación del diagrama de flujos se hace directamente sobre la pantalla de ordenador con el software de simulación que utilizamos, en este caso se utilizó Vensim PLE. Teniendo como base el haber definido las variables de 1º, 2º y 3º orden mencionadas anteriormente, los pasos fueron los siguientes.

- a. Caracterizar los elementos, se procedió a identificar el Nivel y las variables auxiliares en el Diagrama de Flujo, debido a que el rio San Juan no es un depósito para valorar la cantidad que almacena, si no que sus aguas se encuentra en corriente continua, no se considera importante el valor que muestra este Nivel.
- b. Ecuaciones, mediante fórmulas aritméticas de suma y multiplicación se elaboró las ecuaciones que relacionan a todos los elementos en el diagrama de flujo.
- c. Asignar valores a los parámetros, estos fueron los obtenidos de los resultados del 2º monitoreo de calidad de aguas realizados en el río San Juan, asumidos para el modelo o son sacadas de las normas establecidas para el agua superficial en cuerpos naturales (ECA agua), o de los Límites Máximos Permisibles para efluentes en este caso para Minero Metalúrgicos (ver Cuadro N°2).

El periodo de tiempo que se ha considerado en el modelo, el tiempo inicial cero y al tiempo final 24 horas. El diagrama de flujo elaborado para el presente estudio se muestra a continuación:

## CONCENTRACIÓN Y REGULACIÓN DEL PARÁMETRO PLOMO EN EL AGUA DEL RÍO SAN JUAN



Se adjunta a este estudio el programa Vensim para que se pueda revisar su operatividad.

Las siglas de las variables en el diagrama flujo para: Parámetro va y vna, se considera esta diferenciación necesaria porque sus valores son distintos por el mismo hecho que proviene de dos efluentes distintos; al igual con las siglas para Imp va y vna, es importante diferenciarlas porque un límite máximo permisible puede venir de la norma para efluente minero metalúrgico y otro no, ósea uno puede ser para norma de efluentes minero como en este caso y el otro para efluente industrial o municipal el cual correspondería a otro ejemplo.

### Simulación del modelo

Haciendo uso de los valores de los Cuadros N°1 y N°2 se obtuvieron los resultados que se muestran en la Tabla de Datos y Resultados de las Variables Utilizadas en el Diagrama de Flujo (ver Anexo B).

### 2.3. RESULTADOS

Los resultados del uso de la Dinámica de Sistemas al aplicar Diagrama de flujos para determinar la concentración de contaminantes de metales pesados, en función al caudal del: Agua del Río San Juan, tributario y vertimientos, los cuales se muestran en la Tabla de Datos y Resultados de las Variables Utilizadas en el Diagrama de Flujo.

### 2.3.1. Discusión de resultados

- Se ha podido determinar la carga contaminante (en mg/s) en las variables de 1° orden del diagrama flujo como son: Concentración de ingreso del río San Juan, Tributario del río Ragra, vertimiento autorizado- va y vertimiento no autorizado.  
La sumatoria de estas cargas contaminantes determina la concentración que tendrá finalmente la Calidad del agua de ingreso que tendrá en Río San Juan en el área cercana al punto de monitoreo.
- Se ha podido determinar la carga contaminante (en mg/s) en las variables de 3° orden (normas ambientales) del diagrama flujo como son: Concentración deseada-cd en la norma ECA agua; Límite máximo permisible de la norma para efluentes Minero Metalúrgicos para vertimiento autorizado y no autorizado. El modelo permite utilizar el parámetro de la norma ambiental para aguas superficiales ECA agua y también para efluentes sectoriales (minero, industrial, municipal, etc.).
- El valor de la carga contaminante (en mg/s) en la Concentración deseada-cd, muestra si existe una desviación de la concentración que presenta la Calidad de agua de ingreso del río San Juan, con respecto a la estimación calculada de la norma ECA agua, si el valor es cero o menor, significa que la concentración del metal pesado (plomo) en el río San Juan no supera el concentración de la norma en función a su caudal, así tenemos que para Plomo 1 es 49,9 mg lo supera y para plomo 2 es -6,1 no lo supera, por tanto en el segundo caso la concentración o cantidad de plomo presente es menor que la carga contaminante o cantidad en función de la norma ECA agua.
- El modelo permite cuantificar la desviación del plomo (en Plomo 1 y 2) que tiene el cuerpo natural o río y el efluente, con respecto a la norma correspondiente; en el caso de nuestro estudio de simulación para concentraciones distintas del metal plomo se observa que la principal influencia viene del valor que trae el río San Juan en Plomo 1, debido a que el valor de 0,07 mg/l supera el ECA agua (0,05 mg/l) y el valor del río es el de mayor caudal (1500 m<sup>3</sup>/s), con respecto a los otros caudales.
- Las variables de 2° orden del diagrama flujo como son: Parámetro y Caudal tanto para el río San Juan como el río Ragra; Parámetro y Caudal para vertimientos autorizados y no autorizados, sus valores son los resultados del monitoreo de agua realizados o son asumidos en los cuales se quiere simular determinado escenario, por lo que son determinantes en la respuesta que va a tener el sistema.
- Los resultados en los vertimientos autorizados se encuentra dentro de lo permitido y para vertimientos no autorizados se observa que para Plomo 1 (-2) cumple y para Plomo 2 (2 mg) no cumple, el modelo determina o cuantifica cuanta es la desviación con respecto a la norma.
- El modelo permite adicionar más variables si se desea, sean de ríos tributarios o vertimientos que descargan al Río San Juan, así tenemos que si hubieran más tres (03) vertimientos autorizados y (04) vertimientos no autorizados simplemente la suma de la concentraciones de los 03

vertimientos autorizados (cada uno con su caudal y concentración individual), se adicionarían como concentraciones que aportan cada vertimiento en Vertimiento autorizado- va, igual sería con vertimientos no autorizados la sumatoria iría a Vertimiento no autorizado- vna.

- Dentro de las limitaciones del modelo, se tiene que evaluar un parámetro por vez como el plomo, que las variables utilizadas tienen que estar en un área cercana al monitoreo del agua del río evaluado, con el objetivo de evitar variación por otros aportes no considerados.

### **3. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.**

#### **3.1. Conclusiones**

- El modelo permite determinar la carga contaminante proveniente de las fuentes que aportan metales pesados en el agua del río San Juan.
- El modelo permite cuantificar las desviaciones o la diferencia de la Calidad de agua de ingreso con respecto a los Estándares de Calidad Ambiental para agua-ECA agua.
- El modelo permite cuantificar las desviaciones o la diferencia de los vertimientos de aguas residuales en los ríos con respecto a los límites máximos permisibles.
- El modelo permite determinar de dónde proviene el mayor aporte contaminante del metal pesado evaluado de las variables incluidas en el sistema.
- El modelo permite incorporar nuevas variables como vertimientos y ríos tributarios al cuerpo receptor principal evaluado.
- El modelo solo permite determinar un metal por vez.
- Las variables a evaluar tienen que corresponder a la zona cercana de la toma de muestra de la calidad de agua del río a evaluar.

#### **3.2. Recomendación**

- Se recomienda utilizar el modelo como herramienta para la gestión de los recursos hídricos, para ríos con puntos que sean impactados por metales pesados y cuando se conozcan sus datos.

#### **4. BIBLIOGRAFÍA**

Decreto Supremo N°002-2008-MINAM (30 de julio del 2008), Se aprueban los Estándares de Calidad Ambiental de Agua.

Decreto Supremo N°010-2010-MINAM (20 de agosto del 2010), Se aprueban los Límites Máximos Permisibles para la descarga de efluentes líquidos de Actividades Minero – Metalúrgicas.

Martín, J. 2003. Teoría y Ejercicios Prácticos de Dinámica de Sistemas. Juan Martín García, España 336 p. <http://dinamica-de-sistemas.com/libros/sistemas.htm>

Mendoza, E. 2012. Resultado del Monitoreo Participativo de la Calidad del Agua en la Sub Cuenca del Río San Juan,-Pasco, Autoridad Nacional del Agua. Lima, Perú, 123 p.

Mendoza, E. 2013. Evaluación del Estado de la Calidad del Agua en la Sub Cuenca del Río San Juan, Tributario de la Cuenca del Río Mantaro– Provincia de Pasco - Pasco, Autoridad Nacional del Agua. Lima, Perú, 75 p.

Winz, I.; Brierley, G. 2007. The Use of System Dynamics Simulation in Integrated Water Resources Management. School of Geography, Geology and Environmental Science, University of Auckland, New Zealand, 26 p.

Sierra, C. 2011. Calidad del Agua. Universidad de Medellin, Colombia, 457 p.

Simonovic, S. 2002. World Water Dynamics: Global Modeling Of Water Resources. Journal of Environmental Management. Canada, 19 p.

## **Dinámica de Sistemas**

<http://www.dinamica-de-sistemas.com/>



## **Vensim**

<http://www.atc-innova.com/>

## Libros

## Cursos Online



[Ejercicios](#)



[Curso Básico Intensivo en Dinámica de Sistemas](#)



[Avanzado](#)



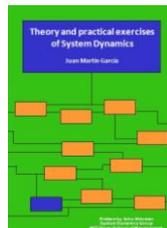
[Curso Superior en creación de modelos de simulación](#)



[Conceptos](#)



[Modelos de simulación en ecología y medioambiente](#)



[English](#)



[Planificación de empresas con modelos de simulación](#)



[Português](#)



[System Thinking aplicado al Project Management](#)