

PROYECTO DE GRADO

**ANÁLISIS Y CORRELACIÓN DE LA INFORMACIÓN DEL CTD EN
LA ESTACIÓN AUTOMÁTICA DEL RIO DE ORO**

PRESENTADO POR

EDWAR ALFONSO FAJARDO DELGADO

RONALD EDISSON CERVANTES GARCÍA



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO – MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2011

PROYECTO DE GRADO

**ANÁLISIS Y CORRELACIÓN DE LA INFORMACIÓN DEL CTD EN
LA ESTACIÓN AUTOMÁTICA DEL RIO DE ORO**

PRESENTADO POR

EDWAR ALFONSO FAJARDO DELGADO

RONALD EDISSON CERVANTES GARCÍA

**PROYECTO DE GRADO PRESENTADO COMO REQUISITO PARA
OPTAR AL TITULO DE INGENIRO CIVIL**

DIRECTOR:

ING. SULLY GÓMEZ ISIDRO

CODIRECTOR:

ING. MIGUEL ÁNGEL PULIDO.

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO – MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2011

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Industrial de Santander y su Escuela de Ingeniería Civil, en la cual con mucho esfuerzo y dedicación nos formaron como ingenieros.

Al grupo de predicción y modelamiento hidroclimático (GPH), donde nos brindaron las herramientas necesarias para el desarrollo de nuestro proyecto.

A la profesora Sully Gómez Isidro, quien siempre nos apoyó y colaboró en nuestro trabajo.

A la Piedecuestana de Servicios Públicos, por su oportuna colaboración para el trabajo realizado en campo.

DEDICATORIA

A mis padres por su constante apoyo y dedicación, A mi familia por su aliento, a mis profesores por sus enseñanzas y a mis amigos por su motivación.

Ronald Edisson Cervantes García

DEDICATORIA

*Especialmente a Dios, por darme la vida y todo lo
que soy,
A mis padres María Elvécia Delgado y Rafael
Fajardo, por todo su amor y apoyo incondicional
en esta etapa de mi vida, y que con gran esfuerzo
me brindaron lo necesario para sacar adelante
mis estudios
A mis hermanos, que han sido mi ayuda siempre.
A todos mis amigos por brindarme siempre su
apoyo y amistad
Edwar Alfonso Fajardo Delgado*

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCION	18
1. EQUIPOS DE MEDICIÓN Y ERRORES EN LA MEDICION DE LA CONDUCTIVIDAD ELECTRICA.	20
1.1. UBICACION.	21
1.2. COMPONENTES DE LA ESTACION.....	22
1.2.1. Diver.	22
1.2.2. Baro Diver.....	22
1.2.3. CTD-Diver.....	23
1.2.4. Tubo Limnimetrico.	24
1.3. USB DIVER READING.....	25
1.4. SOFTWARE DIVER OFFICE.	25
1.5. CALIBRACION DEL CTD DIVER.....	27
1.6. MEDICION DE ERRORES DE CONDUCTIVIDAD ELECTRICA.	28
1.6.1. Errores en la Medición de Conductividad.	28
1.6.2. Pruebas de Laboratorio.	29
2. ANALISIS DE LA INFORMACION.....	33
2.1. CONDUCTIVIDAD.	33
2.1.1. Conductividad Eléctrica.	33
2.1.2. Unidades.	34
2.1.3. Conductividad del Agua.....	34
2.1.4. Calidad del Agua Potable Para la Norma Colombiana.	35

2.2.	CAUDALES.....	38
2.3.	TEMPERATURA.....	39
2.3.1.	Temperatura Ambiente.....	40
2.3.2.	Temperatura del Agua.....	41
2.4.	PRESIONES.....	42
2.4.1.	Presión Atmosférica.....	42
2.4.2.	Presión Absoluta.....	43
2.5.	NIVELES DEL RIO.....	44
3.	CORRELACION DE VARIABLES HIDRAULICAS Y FISICOQUIMICAS.....	46
3.1.	CORRELACION CAUDAL vs. CONDUCTIVIDAD ELECTRICA DEL AGUA.....	46
3.2.	CORRELACION TEMPERATURA DEL AGUA vs. CONDUCTIVIDAD ELECTRICA DEL AGUA.....	50
3.3.	CORRELACION CAUDAL vs. TEMPERATURA DEL AGUA.....	52
3.4.	CORRELACION TEMPERATURA AMBIENTE vs. TEMPERATURA DEL AGUA.....	53
4.	ANALISIS DE RESULTADOS.....	54
4.1.	CORRELACIÓN CAUDAL VS. CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA DEL AGUA.....	54
4.2.	CORRELACIÓN TEMPERATURA DEL AGUA VS. CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA DEL AGUA.....	55
4.3.	CORRELACIÓN CAUDAL VS. TEMPERATURA DEL AGUA.....	57
4.4.	CORRELACIÓN TEMPERATURA DEL AGUA VS. TEMPERATURA AMBIENTE.....	58
4.5.	CURVA DE CALIBRACION.....	59
4.5.1.	Descripción Sitio Para el Aforo.....	62
	CONCLUSIONES.....	63

RECOMENDACIONES	66
BIBLIOGRAFIA	67

TABLA DE CONTENIDO GRAFICAS

FIGURA 1.	Diver.....	22
FIGURA 2.	Baro Diver.	23
FIGURA 3.	CTD-Diver.	23
FIGURA 4.	Tubo Limnometrico.....	24
FIGURA 5.	Ventana de calibración.....	27
FIGURA 6.	Conductividad mes de Enero 2010	36
FIGURA 7.	Ciclo diario de la conductividad en días sin lluvias.....	37
FIGURA 8.	Comportamiento de la Conductividad con eventos de lluvia	37
FIGURA 9.	Caudales diarios a partir del Diciembre de 2009 hasta Abril de 2011. 39	
FIGURA 10.	Temperatura ambiente en días sin eventos de lluvia.....	40
FIGURA 11.	Temperatura del agua en días sin eventos de lluvia.....	41
FIGURA 12.	Variación de la presión atmosférica durante el día.....	42
FIGURA 13.	Presiones absoluta por el Diver y el CTD-Diver durante el mes de Diciembre de 2010	43
FIGURA 14.	Calculo de Niveles del rio.....	44
FIGURA 15.	Error para cálculo de niveles del rio	45
FIGURA 16.	Correlación Caudal vs. Conductividad Eléctrica.....	46
FIGURA 17.	Hidrograma Caudal contra Conductividad (época de recesión). 47	
FIGURA 18.	Evento Mayo 4 de 2010	48
FIGURA 19.	Evento Mayo 27 de 2010	48
FIGURA 20.	Evento 20 Junio 2010	49

FIGURA 21.	Correlación Temperatura del Agua vs. Conductividad Eléctrica (Verano).....	50
FIGURA 22.	Correlación Temperatura del Agua vs. Conductividad Eléctrica.	51
FIGURA 23.	Correlación Caudal vs. Temperatura del Agua	52
FIGURA 24.	Correlación Temperatura del Ambiente vs. Temperatura Agua. .	53
FIGURA 25.	Análisis de Correlación Caudal vs. Conductividad.	54
FIGURA 26.	Análisis de Correlación Temperatura del Agua vs. Conductividad Eléctrica.....	55
FIGURA 27.	Análisis de Correlación Temperatura del Agua vs. Conductividad Eléctrica.....	56
FIGURA 28.	Análisis de correlación Caudal vs. Temperatura del Agua.	57
FIGURA 29.	Análisis de Correlación Temperatura del agua vs. Temperatura Ambiente.....	58
FIGURA 30.	Puntos Para la Regresión.	60
FIGURA 31.	Nueva Curva de Calibración.	61
FIGURA 32.	Sección Transversal para el aforo.....	62

TABLA DE CONTENIDO TABLAS

Tabla 1.	Especificaciones Sonda de Contacto Eléctrico Tipo KII-Q-2.....	29
Tabla 2.	Sustancias de Pruebas en Laboratorio.....	30
Tabla 3.	Error en conductividad del CTD Diver dentro del rango de calibración.....	31
Tabla 4.	Error en conductividad del CTD Diver fuera del rango de calibración	31
Tabla 5.	Valores de conductividad de algunas muestras típicas	35
Tabla 6.	Aforos Anteriores.....	59
Tabla 7.	Aforos Nuevos.....	60
Tabla 8.	Aforos para la nueva Curva de Calibración.....	61

RESUMEN

TITULO:

Análisis y correlación de la información del CTD en la estación hidrométrica automática del río de oro.

AUTOR:

Ronald Edisson Cervantes García, y Edwar Alfonso Fajardo Delgado.

PALABRAS CLAVES:

Estación hidrométrica, Diver, Baro Diver, CTD, curva de calibración, correlación.

DESCRIPCION

En la estación hidrométrica del río de oro se monitorean parámetros hidrológicos como la temperatura, presión atmosférica, conductividad eléctrica del agua, niveles y caudales del río. El municipio de Piedecuesta se abastece de las aguas de este río, la empresa Piedecuestana de servicios es la encargada de suplir este servicio, en la búsqueda de mejorar la calidad de servicio que se presta se hace importante realizar estudio en la fuente para conocer su comportamiento.

La estación hidrométrica automática del río de oro fue construida en el año 2006 (proyecto días y rincón), posteriormente fue monitoreada por los proyectos de grado (saltarín y Hernández 2007), (Flórez y rueda 2008), (Aguilar caballero 2009) y a partir de agosto de 2010 por los autores del presente proyecto de grado, esta estación consta de equipos capaces de registrar de forma continua los parámetros mencionados anteriormente, los equipos con que cuenta la estación son: CTD diver, diver, baro diver.

Para saber los cambios generados en la conductividad eléctrica a causa de un evento de lluvia y cambios en la temperatura se realizaron correlaciones para obtener el tipo de dependencia y correlación que hay entre los parámetros y la variación en su comportamiento dependiendo si es invierno o verano.

Para dar mejor confiabilidad a la curva de calibración en este proyecto se realizaron tres aforos desde octubre de 2010 hasta febrero de 2011 y así reducir su porcentaje de error.¹

*Proyecto de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas, Escuela de Ingeniería Civil, Director: Sully Gómez Isidro, Codirector: Miguel Angel Pulido.

ABSTRACT

TITLE:

Analysis and correlation of information from the CTD in automatic gaging station Rio de Oro.

AUTHORS:

Ronald Edisson Cervantes García and Edwar Alfonso Fajardo Delgado.

KEYWORDS:

Hydrometric station, Diver, Baro Diver, CTD, calibration curve, correlation

DESCRIPTION

In the river gauging station are monitored gold hydrological parameters such as temperature, atmospheric pressure, electrical conductivity of water, river levels and flows. Piedecuesta is supplied by the waters of this river. Piedecuestana Services Company is responsible for supplying this service. In seeking to improve the quality of service provided, it is important to study the source to understand its behavior.

The automatic gaging station Rio de Oro was built in 2006 (project by DIAZ and RINCON) was subsequently monitored for degree projects (project by SALTARIN and HERNANDEZ, 2007), (Flores and Lopez, 2008) (Aguilar and Caballero, 2009) and from August 2010 by the authors of this dissertation. This station has equipment capable of recording continuously the parameters outlined above. The equipment available to the station is: CTD diver, diver, diver Baro.

To see the changes generated in the electrical conductivity due to a rain event and changes in temperature, correlations were performed to obtain the type of dependency and correlation between the parameters and the change in their behavior depending on whether it is winter or summer.

To provide better reliability to the calibration curve on this project, three appraisals from October 2010 to February 2011 were made in order to reduce its percentage of error.²

* Project

** Faculty of Physics Mechanical Engineering, School of Civil Engineering, Director: Sully Gómez Isidro, Codirector: Miguel Angel Pulido.

INTRODUCCION

En el afán de avanzar hacia el futuro y encaminar a una población al crecimiento y desarrollo, se hace indispensable mejorar la calidad de los servicios que suplen las necesidades básicas de la población. Una de las necesidades básicas que siempre debe estar en busca de mejorar su calidad es el suministro de agua, en la búsqueda de mejorar la calidad de este servicio el estudio de las aguas superficiales toma vital importancia. El río de Oro objeto de este estudio en este trabajo, es la fuente de agua de la cual se abastece el municipio de Piedecuesta, servicio que es prestado por la empresa Piedecuestana de Servicios, que junto con la Universidad Industrial de Santander a través del Grupo de Predicción y Modelamiento Hidroclimático (GPH) por medio de un convenio en el 2006 construyeron la estación hidrométrica automática del río de Oro.

En proyectos anteriores [4] se instalaron equipos en la estación hidrométrica automática del río de Oro que permiten medir parámetros como presión, temperatura, niveles y conductividad eléctrica del agua, también se realizaron aforos para calcular el caudal del río y así estimar una curva de calibración que permite relacionar la altura del río con el caudal en ese momento, durante el tiempo de funcionamiento de la estación en cada una de los proyectos a esta curva se le han añadido nuevos puntos para optimizar y mejorar su precisión.

La conductividad eléctrica es un buen indicador de la calidad del agua, dado que sus cambios son debidos a muchos parámetros presentes en la fuente, algunos de los parámetros que afectan los cambios de la conductividad en un río son principalmente la temperatura, el cambio en los caudales del río, la cantidad de iones de sales disueltas en el agua. Los cambios en el caudal son principalmente los causante de los cambios bruscos en la conductividad eléctrica del agua, debido a que el aumento o disminución del flujo en el río hace cambiar la cantidad de iones disueltos en el agua y la conductividad varia directamente con la

concentración de iones en solución. Al hacer un seguimiento a estos comportamientos y establecer correlaciones entre ellos se puede conocer mejor el efecto que tendrán en la calidad del agua y el flujo del río, como en aumento o disminuciones en la contaminación o el grado de salinidad del río, y así poder hacer predicciones y prever posibles emergencias para la población debido a crecientes en el río o desabastecimiento en épocas de verano. Conociendo algunas de sus utilidades actuales y futuras es importante tener certeza en los datos registrados y los comportamientos que estos nos indican.

1. EQUIPOS DE MEDICIÓN Y ERRORES EN LA MEDICION DE LA CONDUCTIVIDAD ELECTRICA.

En la estación hidrométrica automática del río de oro, se encuentran instalados equipos que permiten tomar registros en forma continua de algunos parámetros Físico-Químicos del río y un sistema que mantiene seguros los equipos de medición. En los datos registrados por el CTD Diver de conductividad eléctrica se presentan algunos errores y es importante al momento de calibrar el equipo hacer un cálculo de estos errores para asegurarse que estos errores se encuentran dentro de los rangos permitidos.

1.1. ESTACION HIDROMETRICA AUTOMATICA DEL RIO DE ORO

La estación hidrométrica automática del río de Oro fue instalada en el año 2006 como proyecto de grado de los estudiantes Díaz & Rincón [2], por medio del convenio entre la UIS-Grupo Predicción Hidroclimática (GPH) y la empresa prestadora de servicios del municipio de Piedecuesta, Santander; Piedecuestana de Servicios. La estación fue monitoreada durante el año 2007 en nuevo proyecto de grado a cargo de Hernández & Saltarín [5].

Durante el periodo comprendido entre agosto de 2007 y octubre de 2008 la estación no estuvo en funcionamiento. Después de Octubre de 2008 y hasta Enero de 2009 el funcionamiento de la estación estuvo a cargo del proyecto llevado a cabo por Flórez & Rueda [4]. Estos proyectos mencionados además de niveles de agua, estudiaron parámetros como la temperatura y presión atmosférica. Con la ayuda del ADV Flow Tracker se tomaron medidas de caudal y utilizando estos datos se creó la curva de calibración que relaciona la altura con el nivel del agua del río.

Desde febrero de 2009 hasta julio de 2010 la estación fue monitoreada por el proyecto que desarrollaron los estudiantes Aguilar & Caballero [1], en este proyecto se le da continuación a los estudios de los parámetros mencionados en proyectos anteriores y se agrega un nuevo parámetro a medir que es la conductividad eléctrica, para medir este parámetro y mejorar los demás parámetros se instala en la estación un nuevo instrumento llamado CTD Diver.

A partir de agosto de 2010 la estación ha sido monitoreada por Edwar Alfonso Fajardo Delgado y Ronald Edison Cervantes García estudiantes de ingeniería civil, pertenecientes al grupo de investigación GPH. (Grupo de Predicción y Modelamiento Hidroclimático) y autores de la presente trabajo.

1.1. UBICACION.

La estación se encuentra ubicada en la sub cuenca del río de Oro, al sur de la cuenca superior del río Lebrija. El río de Oro nace aproximadamente a 3500 msnm, 20 y es considerado hasta este sitio como un río de montaña. Este río pasa por los municipios de Piedecuesta y Girón, se une con el río Surata para formar el río Lebrija.

La empresa de acueducto del municipio de Piedecuesta (LA PIEDECUESTANA) abastece a la población del municipio con el agua de este río, la bocatoma de dicho acueducto se encuentra aguas abajo de la estación, aproximadamente a 100m, dicha captación está a una altura de 1090msnm.

La estación se encuentra a una altura de aproximadamente 1105 msnm y unas coordenadas de 6°59'41.36" N; 73°02'10.91" O, la sección de aforo se encuentra aproximadamente a 40m aguas abajo de allí. [5]

1.2. COMPONENTES DE LA ESTACION.

Para llevar a cabo el monitoreo y registro de los parámetros presión relativa, presión absoluta, temperatura y conductividad eléctrica del agua en la estación hidrométrica automática del río de Oro, se cuenta con los siguientes instrumentos de medición: Diver, Baro Diver, y CTD Diver, los cuales se encuentran suspendidos dentro de un tubo Limnimetrico.

1.2.1. Diver.

El Diver es un mecanismo que consta de sensores que permiten medir la presión del agua y la temperatura de esta, un sensor de memoria para almacenar los datos y de una batería.

El Diver que se usó en este proyecto para la toma de datos es el DI241, con un rango de medición en altura de agua de hasta 10 m de agua y una precisión promedio de (1%) de agua dado por el fabricante Schlumberger Water Service. [9]

FIGURA 1. Diver.



1.2.2. Baro Diver.

Equipo utilizado para medir la presión atmosférica o también llamada presión barométrica para posteriormente hacer la compensación con el Diver y así obtener la altura de agua. También registra la temperatura del ambiente. El Baro Diver usado es el DI250. [9]

FIGURA 2. Baro Diver.



1.2.3. CTD-Diver.

Este equipo puede medir la temperatura y los niveles de agua, pero su principal característica es que mide también la conductividad eléctrica del agua en mili-siemens por centímetro (mS/cm). Un cambio en la conductividad puede indicar alteraciones en el flujo, aumentos o disminuciones en la contaminación o en la salinización.

La conductividad se mide con una celda de medición de 4 electrodos. Este tipo de celda de medición es relativamente indiferente a los sensores sucios; por lo tanto, necesita un mantenimiento mínimo.

El CTD Diver usado es el DI263 con un rango de medición en la altura de agua de 30 m y una precisión de 1% dada por el fabricante. [9]

FIGURA 3. CTD-Diver.



El Diver y el Baro Diver tienen capacidad para almacenar 24.000 medidas y el CTD Diver tiene una capacidad de 16.000 medidas en la memoria interna y una batería para aproximadamente 10 años.

1.2.4. *Tubo Limnimetrico.*

FIGURA 4. Tubo Limnimetrico.



Provee el medio necesario para las mediciones realizadas por los dispositivos automáticos de la estación; en cuanto a condiciones de flujo, seguridad y protección contra objetos arrastrados por el río. Está anclado a la roca maciza del talud con 8 pernos de superficie corrugada. La longitud del tubo se estimó teniendo en cuenta que el Baro Diver ubicado en la parte superior del tubo nunca esté sumergido en el agua.

El tubo es de acero inoxidable, hueco y cilíndrico de 6 pulgadas de diámetro interno, espesor de 7.5 mm, 3 m de longitud y está perforado en la parte inferior para permitir la entrada horizontal del flujo. En el tercio inferior de su longitud posee tres agujeros. La tapa está fabricada del mismo material y con dos agujeros

en la parte superior para permitir la entrada y salida de aire, evitando presiones diferentes a la atmosférica. Para su acceso posee una escalera que está unida al tubo con soldadura.

Para abrir el tubo, se utilizan dos herramientas, una barra con dos varillas soldadas, las cuales encajan exactamente en los orificios superiores de la tapa del tubo Limnométrico y otra llave hexagonal con la cual se aflojan los tornillos que unen la tapa con el tubo. [5]

1.3. USB DIVER READING.

Dispositivo que se utiliza para conectar los equipos que se tienen en la estación hidrométrica a un computador por medio de conexión USB para poder descargar la información, reprogramar la toma de datos en la estación y para la calibración del CTD Diver.

El dispositivo cuenta con dos Terminales, uno de ellos es para conectar el Diver, el Baro Diver y el CTD Diver. El otro Terminal es una conexión USB para establecer la comunicación entre el instrumento y el computador. [9]

1.4. SOFTWARE DIVER OFFICE.

Diver office es un programa desarrollado para leer, descargar, programar y procesar la información de los equipos que se utilizan en la estación hidrométrica para la medición de niveles.

Este software fue creado por Schlumberger Wáter Services para ser utilizado con los equipos Diver, Baro Diver, CTD Diver y OTD Diver los cuales son producidos por Eijkelkamp Agrisearch Equipment.

Diver-Office ofrece las siguientes prestaciones:

- Interfaz sencilla e intuitiva.
- Leer o programar registradores de datos Diver.
- Arrancar o detener registradores de datos Diver con varios métodos de inicio.
- Calibrar CTD-Diver.
- Importar o exportar datos de monitorización en diversos formatos.
- Visualizar datos de series temporales en tablas o mediante gráficos.
- Realizar compensaciones barométricas de datos de nivel del agua.

La instalación es sencilla, Diver-Office funciona en todas las versiones actuales de Microsoft Windows y es fácil de instalar en un ordenador portátil o de escritorio. A medida que se lanzan nuevas versiones de Microsoft Windows, el sitio web www.swstechnology.com contiene más información acerca de las versiones de Windows admitidas, etc. El sitio siempre proporcionará la última versión de Diver-Office para descargar o actualizar en forma gratuita.

El manual para Diver-office proporciona una completa y detallada información sobre cada una de las operaciones que este ofrece y como llevar a cabo cada una de estas. También podemos encontrar en el proyecto de (Aguilar & Caballero) información sobre el manejo del software y sus aplicaciones basada en manual del Diver-office. [9]

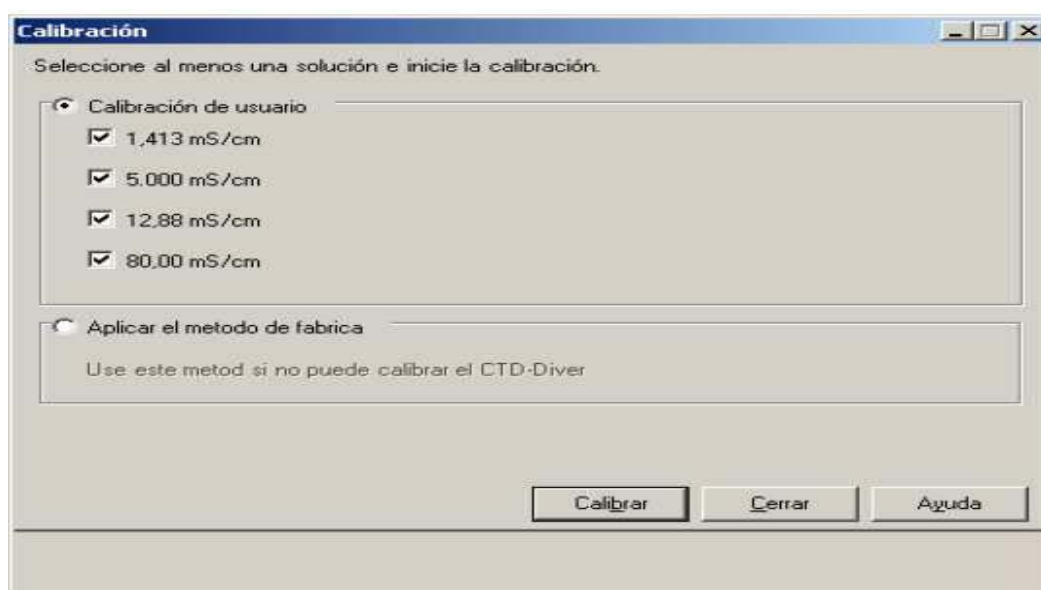
1.5. CALIBRACION DEL CTD DIVER.

El CTD Diver se puede calibrar en cuatro puntos específicos (1.413; 5; 12.88 y 80 mS/cm) dependiendo del tipo de comportamiento que tenga la conductividad eléctrica en el lugar donde se estén realizando los estudios. En la estación hidrométrica automática del río de Oro el CTD-Diver se calibro para un rango de medición de conductividades eléctricas de (0 - 1.413 mS/cm).

El CTD-Diver se calibra con la ayuda del Diver-Office. Para comenzar la calibración necesita tener conectado el CTD-Diver conectado al computador y al mismo tiempo colocarlo en una solución de calibración con una conductividad estándar de 1.413. mS/cm (Producido en Colombia por MOL LABS LTDA), la solución deberá estar a una temperatura entre 5 °C (41 °F) y 30 °C (86 °F).

Para calibrar el CTD-Diver, haga clic en el botón (Calibración) situado en la barra de herramientas del cuadro de diálogo Diver. Al hacer clic, aparecerá el siguiente cuadro de diálogo.

FIGURA 5. Ventana de calibración.



Seleccione las casillas de verificación situadas junto a la solución apropiada que se utilizará para calibrar el Diver. Haga clic en el botón [calibrar] para empezar a calibrar el CTD-Diver.

Diver-Office calibrará el CTD-Diver de acuerdo con las soluciones especificadas. Si la calibración es satisfactoria, aparecerá un mensaje de confirmación.

1.6. MEDICION DE ERRORES DE CONDUCTIVIDAD ELECTRICA.

En búsqueda de tener mayor certeza sobre la veracidad de los datos registrados por los dispositivos en campo, es necesario comparar los datos dados por el CTD Diver con los dados por otros dispositivos que nos brinden mayor precisión para usarlos como referencia y simular diferentes condiciones de calidad del agua.

1.6.1. Errores en la Medición de Conductividad.

Debido a que los datos con los que se trabaja en este proyecto son suministrados por dispositivos electrónicos hay algunos errores a los que están expuestos:

- Errores por el instrumento o equipo de medición: pueden deberse a defectos de fabricación (dado que es imposible construir aparatos perfectos). Estos pueden ser deformaciones, falta de linealidad, imperfecciones mecánicas, falta de paralelismo, etc.
- El error instrumental tiene valores máximos permisibles, establecidos en normas o información técnica de fabricantes de instrumentos, y puede determinarse mediante calibración.

En este caso las especificaciones del equipo respecto a conductividad nos recomiendan:

- ✓ Rango de medida: 0.001 mS/cm – 120 mS/cm
- ✓ Precisión: 1% con respecto a un mínimo de 0.001 mS/cm
- Errores en el instrumento: Esta es la comparación de las lecturas proporcionadas por un instrumento o equipo de medición contra un patrón de mayor exactitud. En este caso será la Sonda Multi-Paramétrica de Contacto Eléctrico Tipo KII-Q-2 marca Seba [8] la cual se ha utilizado en otros trabajos y pruebas en campo con resultados satisfactorios, la cual tiene las siguientes especificaciones:

Tabla 1. Especificaciones Sonda de Contacto Eléctrico Tipo KII-Q-2

Sonda de Contacto Eléctrico Tipo KII-Q-2		
Rango	Precisión	Resolución
0...200mS	+/- 1μS (0...200μS)	0,001Ms
Temperatura: -5...50°C	+/-0,5% (> 200μS)	

1.6.2. Pruebas de Laboratorio.

Para verificar que los datos obtenidos por el CTD Diver en campo corresponden con la realidad se realizaron pruebas en laboratorio, comparando los datos obtenidos por el CTD Diver con los datos suministrados por otros dispositivos de medición, en este caso se utilizó una Sonda Multi-Paramétrica de Contacto Eléctrico Tipo KII-Q-2. Para estimar los errores que presenta se preparan varias soluciones de agua con sal.

- ✓ Con un patrón de conductividad de 1.4130 mS/cm ± 0.002 mS/cm (Producido en Colombia por MOL LABS LTDA) se calibra el CTD Diver.

- ✓ Inmediatamente después de ser calibrado el CTD Diver, se puso en funcionamiento sumergiéndolo en agua limpia del grifo, durante una fracción de tiempo ya definida (10 min).
- ✓ Se mide Conductividad con la Sonda Multi-Paramétrica de Contacto Eléctrico Tipo KII-Q-2.
- ✓ Se limpian los dos aparatos con agua destilada para garantizar que la muestra siguiente no va a ser alterada por los residuos de sal de la muestra anterior.

Se repite este procedimiento para cada una de las muestras.

Posteriormente se comparo la conductividad medida por el CTD Diver con la conductividad medida por la Sonda Multi-Paramétrica de Contacto Eléctrico tipo KLL-Q-2 marca Seba (Proyecto de grado Nieto & Pulido), los resultados fueron muy similares:

Tabla 2. Sustancias de Pruebas en Laboratorio.

Muestra	Sustancia	Conductividad eléctrica (mS/cm)	
		CTD Diver	Sonda Multi-Paramétrica
1	Agua de Grifo	0.143	0.141
2	Agua + Sal	0.386	0.392
3	Agua + Sal	0.954	0.938
4	Agua + Sal	2.021	1.989
5	Agua + Sal	16.366	15.67

Se realiza el cálculo del error relativo para tener un indicio de la exactitud de los registros de conductividad eléctrica medidos por el CTD Diver, tomando como medida patrón los registros de conductividad de la Sonda Multi-Paramétrica:

$$\text{Error relativo} = \frac{\text{Registro de la Sonda} - \text{Registro del CTD}}{\text{Registro de la Sonda}} * 100$$

Tabla 3. Error en conductividad del CTD Diver dentro del rango de calibración.

Conductividad dentro del rango de calibración			
Sustancia	CTD Diver	Sonda Multi-Paramétrica	Error Relativo
	mS/cm	mS/cm	%
1	0,143	0,141	1,42%
2	0,386	0,392	1,51%
3	0,958	0,942	1,71%
		Promedio	1,55%

Tabla 4. Error en conductividad del CTD Diver fuera del rango de calibración

Conductividad fuera del rango de calibración			
Sustancia	CTD Diver	Sonda Multi-Paramétrica	Error Relativo
	mS/cm	mS/cm	%
4	2,021	1,989	1,61%
5	16,366	15,67	4,44%
		Promedio	3,10%

Las tablas anterior muestra la comparación de las conductividades medidas por el CTD Diver y la sonda Multi-Paramétrica con errores bajos en las zonas que se encuentran dentro del rango de calibración y a medida que se sale de este rango los errores en la medición aumentan. Con esto podemos decir que el CTD Diver mide correctamente las conductividades bajas (menores a 1.413 mS/cm), ya que fue calibrado para tal fin. En dado caso que se llegase a necesitar que el CTD Diver registrara conductividades altas (mayores a 1.413 mS/cm) se tendría que calibrar el instrumento para tal fin.

Para el caso actual en el que se utiliza el instrumento se miden conductividades promedio menores a ($< 1.413 \text{ mS/cm}$) y no es necesaria la calibración completa del CTD Diver.

2. ANALISIS DE LA INFORMACION.

A partir de diciembre de 2009 que es la fecha en que se instala el CTD-DIVER se continúa con un proceso de recolección de información en la estación automática del río de Oro. Con el Baro, el Diver y el CTD_Diver, equipos programados para registrar cada tres minutos durante 33 días mínimo, según su capacidad. Estos datos por si solos no nos brindan mayor información acerca del comportamiento de las variables hidráulicas y fisicoquímicas del río, en algunos casos como el de la temperatura ambiente, temperatura del agua y conductividad eléctrica no es necesario hacerles más cálculos para poder graficarlos y estudiarlos; por otro lado en el caso de las presiones es necesario hacer unas series de operaciones (resta de presiones y curva de calibración) para poder encontrar los niveles y posteriormente calcular los caudales que se graficaran en la curva de calibración.

2.1. CONDUCTIVIDAD.

La conductividad de una sustancia se define como "la habilidad o poder de conducir o transmitir calor, electricidad o sonido" [11]. Es una medida de cuanto (no de qué) material esta disuelto en el agua. La conductividad por sí sola, no es adecuada para caracterizar el agua.

2.1.1. Conductividad Eléctrica.

La conductividad eléctrica de un medio, se define como la capacidad que tienen el medio (que por lo general contiene las sales orgánicas e inorgánicas en solución o electrolitos) para conducir la corriente eléctrica. El agua pura, prácticamente no conduce la corriente, sin embargo el agua con sales disueltas conduce la corriente eléctrica. Los iones cargados positiva y negativamente son los que conducen la

corriente, y la cantidad conducida dependerá del número de iones presentes y de su movilidad. En la mayoría de las soluciones acuosas, entre mayor sea la cantidad de sales disueltas, mayor será la conductividad. El cloruro de sodio por ejemplo se encuentra en el agua como Na^+ y Cl^- . El agua de alta pureza que en el caso ideal contiene solo H_2O sin sales o minerales tiene una conductividad eléctrica muy baja alcanzando valores inferiores a $0,00005 \text{ mS/cm}$.

En Colombia según las normas técnicas para la calidad del agua potable en el decreto 475 de 1998 utiliza la conductividad eléctrica como un parámetro para medir la calidad del agua siendo permisible en el rango entre 0.05 mS/cm y 1 mS/cm .

2.1.2. Unidades.

La conductividad es el recíproco de la resistencia en Ohmios medida entre las caras opuestas de un cubo de un centímetro de lado de una solución acuosa a una temperatura especificada. Esta solución se comporta como un conductor eléctrico donde se pueden aplicar leyes físicas de la resistencia eléctrica. []

Las unidades de la conductividad eléctrica son Siemens sobre centímetro (S/cm) que son numéricamente equivalentes al Ohm sobre centímetro (ohm/cm).

2.1.3. Conductividad del Agua.

El Agua pura es un buen conductor de la electricidad. El agua destilada ordinaria en equilibrio con dióxido de carbono en el aire tiene una conductividad aproximadamente de $10 \times 10^{-6} \text{ W}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$ (0.00002 mS/cm). Debido a que la

corriente eléctrica se transporta por medio de iones en solución, la conductividad aumenta cuando aumenta la concentración de iones.

Los cambios de conductividad en el agua se deben a la variación en la concentración de materiales disueltos, debido a eso en la medida en que el río cambia su caudal transporta consigo mayor o menor cantidad de sólidos disueltos.

Tabla 5. Valores de conductividad de algunas muestras típicas

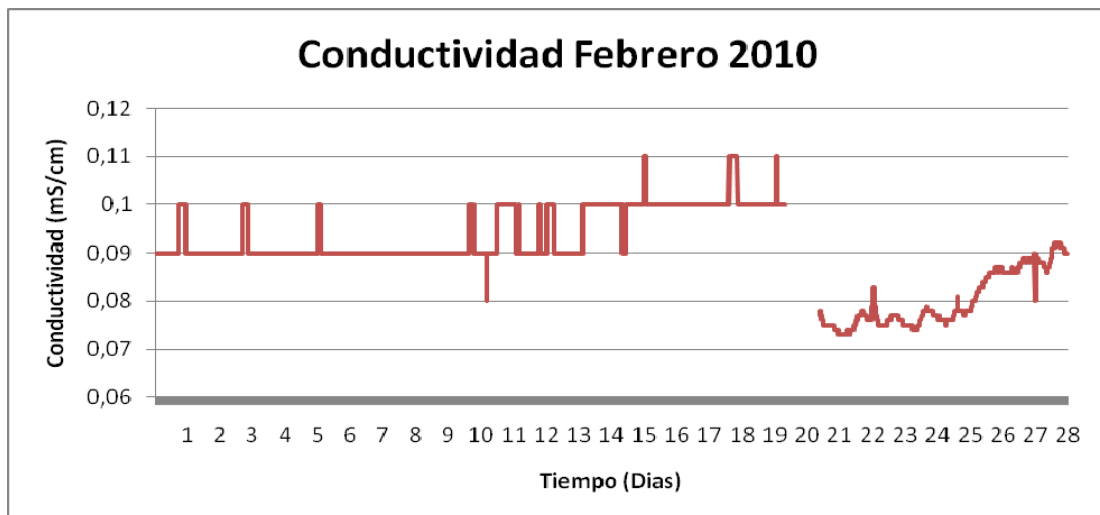
CONDUCTIVIDAD A 18 °C			
Agua	Intervalo de conductividad	$\mu\text{S/cm}$	mS/cm
Químicamente Pura		0,05	0,00005
Destilada	0.1-4	0,0001	0,004
Agua de Lluvia	20-100	0,02	0,1
Agua Blanda	40-150	0,04	0,15
Agua Dura	200-500	0,2	0,5
Ríos	100-1000	0,1	1
Agua Subterránea	200-1500	0,2	1,5
Agua de Estuario	200-2000	0,2	2
Agua de Mar	40000	40	

2.1.4. Calidad del Agua Potable Para la Norma Colombiana.

En el decreto 475 de 1998 se expiden normas técnicas para la calidad del agua potable y en el 2007 se le hacen algunas modificaciones en el decreto 1575 [10], en el Capítulo III de el decreto 475 de 1998 en el (Artículo 6) encontramos los “criterios organolépticos y físicos de la calidad del agua potable” [7] en este se expresa una tabla de los diferentes parámetros físicos que se evalúan para tener un agua de calidad que se pueda distribuir al público, dentro de estos criterios encontramos la conductividad, la cual debe estar dentro de los siguientes rangos (0.05 – 1 mS/cm).

El CTD-Diver se instaló durante el mes de diciembre del año 2009, a partir de ese momento se tienen registros de conductividad del agua cada 3 minutos, sin embargo debido a que a la hora de programar el equipo se le asignaron solo dos decimales los registros no eran muy útiles debido a que no registraban mayores cambios en la conductividad del agua. En Febrero del 2010 se identificó este problema y se programó de modo que las cifras decimales fueran tres para así poder identificar más claramente los cambios en la conductividad del agua.

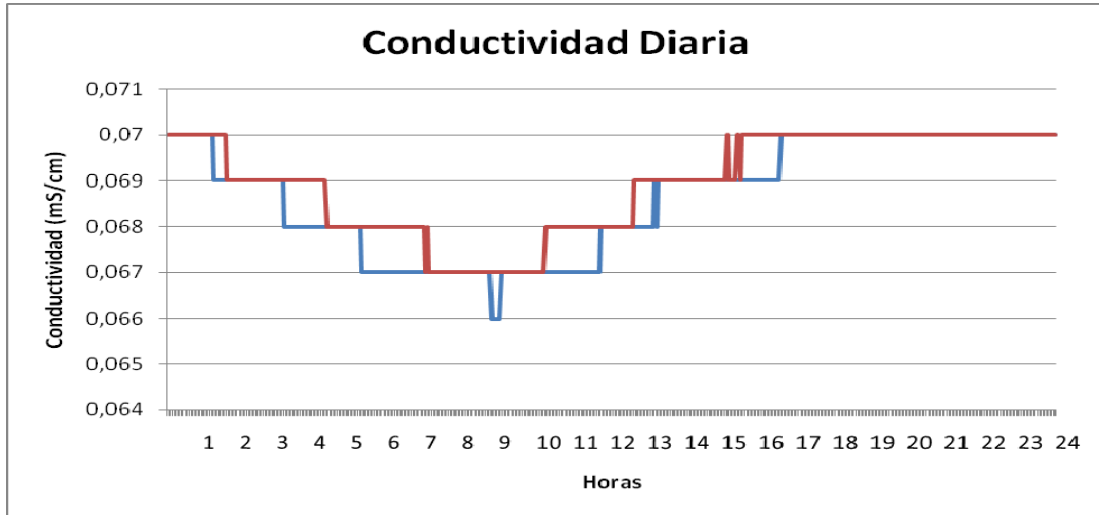
FIGURA 6. Conductividad mes de Enero 2010



La conductividad en los días sin lluvia mantienen un ciclo diario debido al cambio de temperatura del agua, la amplitud de estas oscilaciones no suelen superar los 0.05 mS.

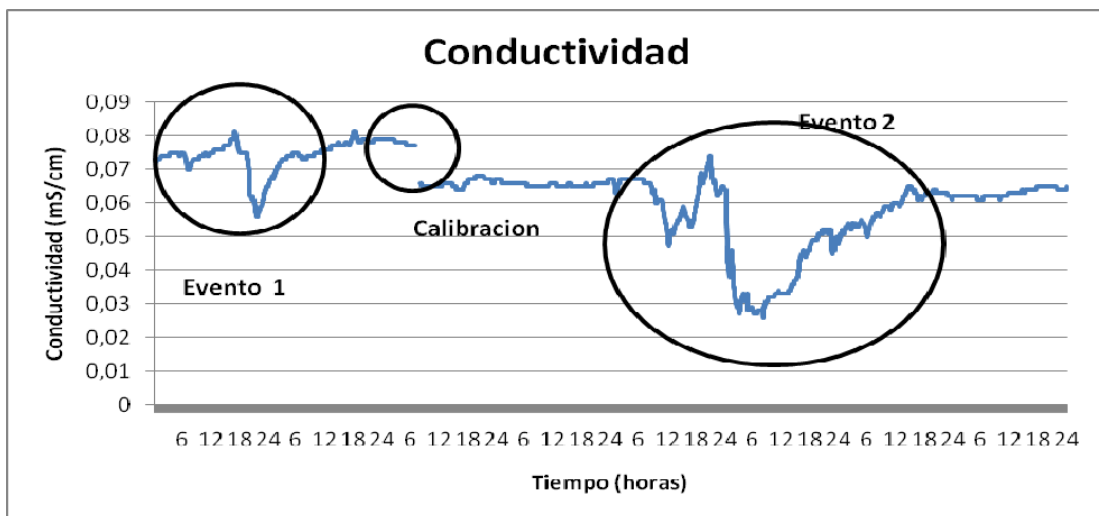
El ciclo diario de la conductividad eléctrica registra su valor más bajo entre las 8 a.m. y las 9 a.m., mientras que los registros más altos se alcanzan habitualmente después de las 4 p.m. en donde se mantienen constantes hasta más o menos la media noche en donde empiezan a descender como se muestra en la siguiente grafica.

FIGURA 7. Ciclo diario de la conductividad en días sin lluvias.



Ante un evento de lluvia la conductividad altera su ciclo diario y desciende de acuerdo a la intensidad y a la duración de este, una vez la conductividad ha alcanzado su pico más bajo empieza a aumentar hasta recobrar el ciclo diario habitual, a continuación se muestra en la grafica el comportamiento de la conductividad durante dos eventos:

FIGURA 8. Comportamiento de la Conductividad con eventos de lluvia



Los valores mínimos de la conductividad se presentan debido a eventos importantes de lluvia, el valor más bajo registrado durante el periodo de observación se presentan debido al gran evento de 19 de Diciembre de 2010 alcanzando un valor de 0.025 mS/cm. El valor máximo se presento posterior a un evento registrado el 2 de Noviembre de 2010 alcanzando un valor de 0,233 mS/cm.

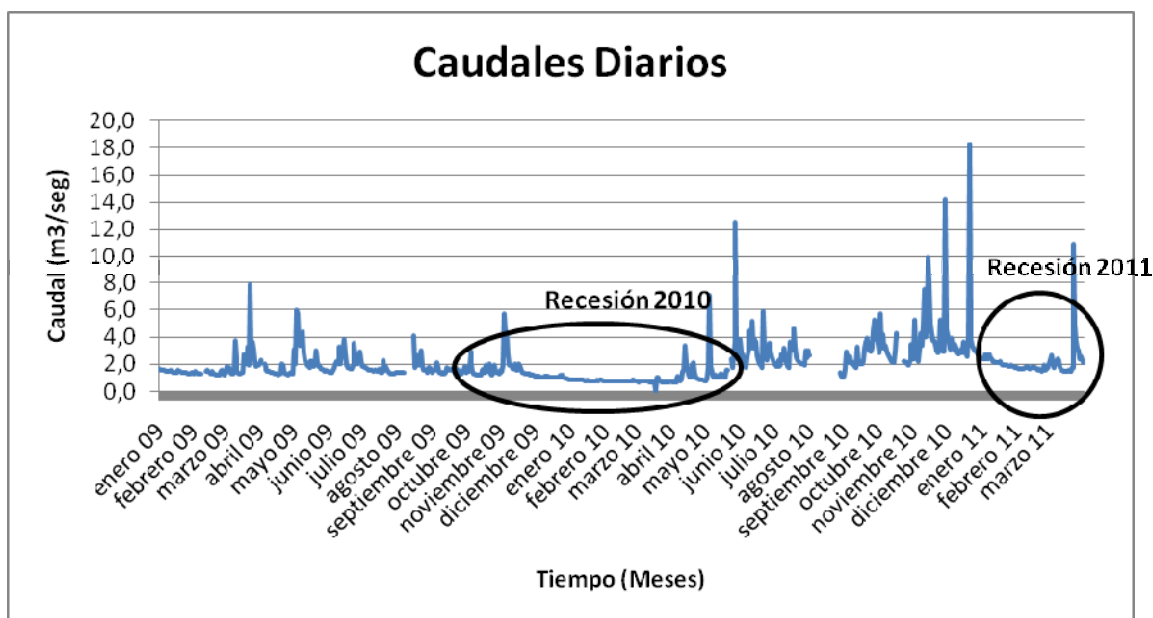
2.2. CAUDALES

A pesar de las variaciones y errores de los equipos, podemos por medio de la compensación calcular los niveles de agua cada 3 minutos que es el rango de tiempo en el cual se toman los datos presiones, con estos y por medio de la ecuación obtenida de la curva de calibración realizada por Florez & Rueda [] y alimentada por nuevos aforos por Aguilar & Caballero [] y por los autores de este trabajo:

$$Q = 1.067 * 10^{-4} * H^{2.516}$$

Se pueden calcular los caudales cada 3 minutos, y posteriormente, si desea promediar los datos registrados durante un día.

FIGURA 9. Caudales diarios a partir del Diciembre de 2009 hasta Abril de 2011.



El caudal alcanzó sus valores máximos en el mes de Marzo de 2011 en el transcurso de una avalancha, en donde según la curva de calibración se llegó a un caudal 103,6 m³/seg. Los registros más bajos de caudal obtuvieron en el mes de Mayo en el transcurso de una recesión de aproximadamente 120 días llegando a medir menos de 0,5 m³/seg.

2.3. TEMPERATURA.

La temperatura es una medida de calor o energía térmica de las partículas en una sustancia, medio u objeto. En algunos casos la temperatura puede alterar las propiedades Físico-Químicas en este caso del agua.

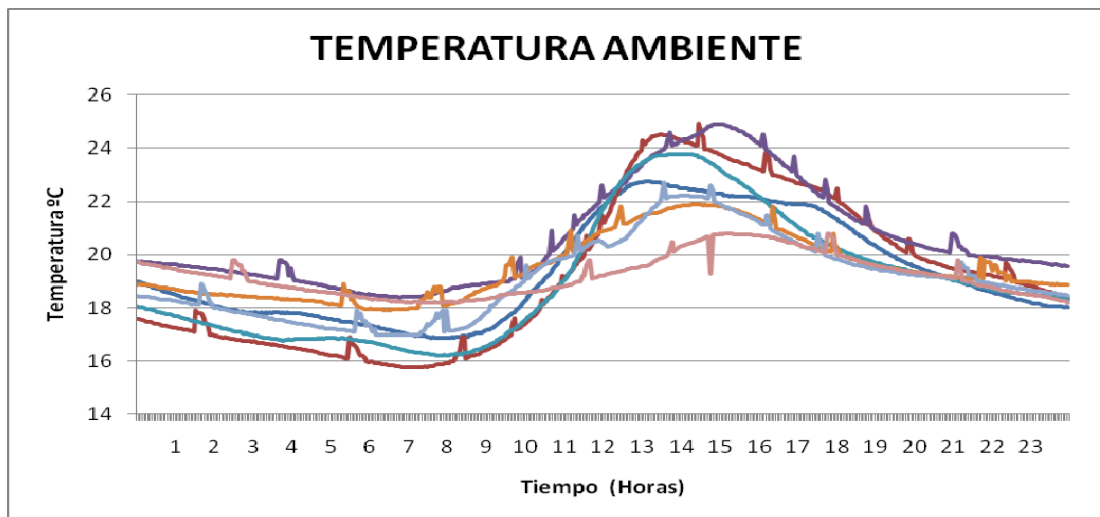
Al igual que en el caso de la conductividad y el caudal los registros de temperatura se hacen cada tres minutos y en unidades de grados centígrados (°C)

2.3.1. Temperatura Ambiente.

Los datos de temperatura ambiente son registrados por el dispositivo Baro-Diver. Según los registros durante más de 15 meses a partir de Diciembre de 2009, la temperatura ambiente más baja registrada fue 14.66°C en el mes de Diciembre del 2009. La temperatura ambiente más alta registrada durante el tiempo de observación fue 31.15°C en el mes de Marzo 2010 durante la recesión.

A continuación en la grafica se muestran superpuestos el comportamiento de la temperatura ambiente durante algunos días sin eventos de lluvia, con el objeto de identificar un ciclo diario para los días sin eventos de lluvias. Se puede observar que en un día sin eventos de lluvia las temperaturas más bajas se registran entre las 7 a.m. y 9 a.m. y que las más altas se registran entre las 1 p.m. y 3 p.m.

FIGURA 10. Temperatura ambiente en días sin eventos de lluvia.



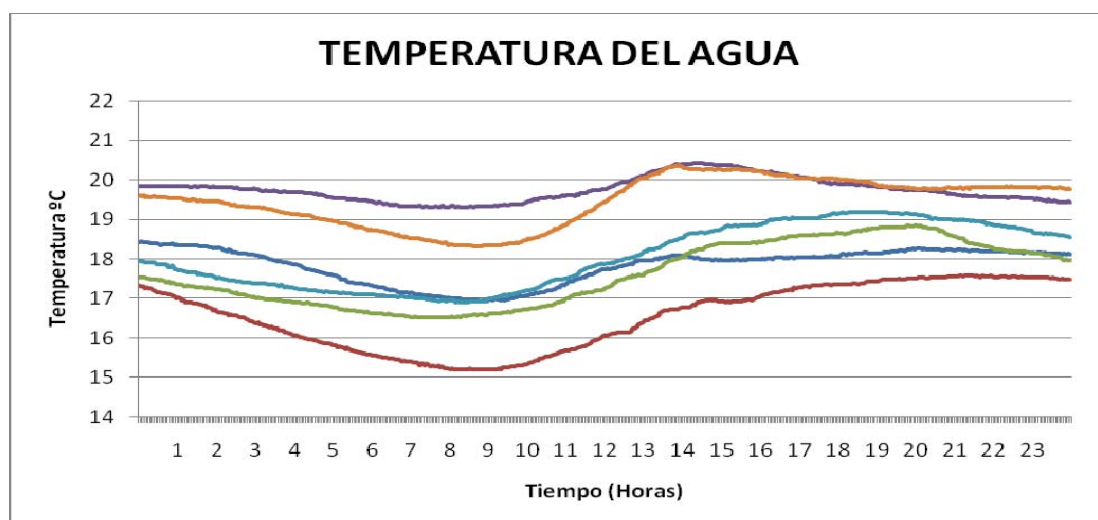
2.3.2. Temperatura del Agua.

La temperatura del agua es el parámetro sobre el cual se tiene más certeza sobre sus registros, ya que se tiene el Diver y el CTD-Diver para la recolección de información y en sus registros se puede observar que son idénticos.

En los registros, la temperatura del agua más baja presentada fue 14.31°C durante el mes de Diciembre de 2009 y La temperatura más alta fue registrada en el mes de Mayo de 2010 con fue 21.92°

La temperatura ambiente y la temperatura del agua para los días sin eventos de lluvia presentan un patrón similar, sin embargo debido a que en el agua las temperaturas son más bajas las diferencias son menos notorias, pero generalmente las temperaturas más bajas se siguen registrando en las horas de la mañana y las más altas después de pasado el medio día.

FIGURA 11. Temperatura del agua en días sin eventos de lluvia.



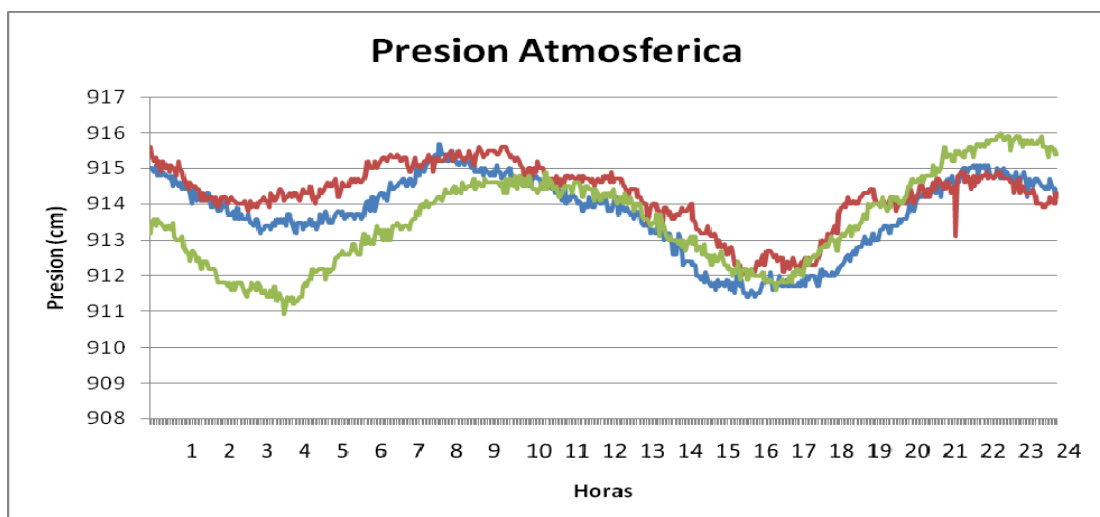
2.4. PRESIONES.

En la estación automática se están registrando actualmente de manera sincronizada cada tres minutos presión atmosférica y presión absoluta, de tal modo que se pueda realizar una resta de presiones y así poder calcular el nivel del río en centímetros en el mismo periodo de tiempo.

2.4.1. Presión Atmosférica.

La presión atmosférica medida por el Baro mantiene un ciclo para todos los días notándose en este un par de valles en las madrugadas y las tardes, y además dos crestas en las horas de la mañana y la media noche. Las diferencias entre estas oscilaciones no suelen ser inferiores a 4 cm. ni superiores a 6 cm, estas oscilaciones pueden deberse a que cuando el aire está frío, desciende, haciendo aumentar la presión, y cuando el aire está caliente, asciende, haciendo bajar la presión.

FIGURA 12. Variación de la presión atmosférica durante el día.

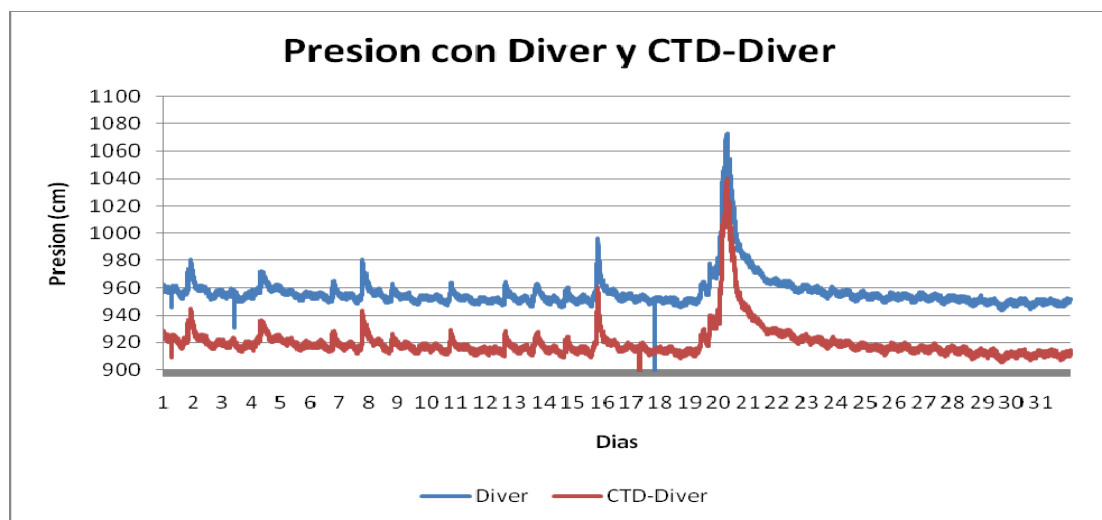


2.4.2. Presión Absoluta.

La presión absoluta hace referencia a la fuerza que hace la columna de agua sobre la lámina de agua en la que se está haciendo la medida, este registro lo están realizando el Diver y el CTD-Diver en centímetros.

La oscilación registrada durante un día sin eventos de lluvia se deben a la presencia de aire caliente o frío sobre en el ambiente, estas oscilaciones generalmente mantienen su amplitud entre los 8 cm o 9 cm. pudiendo aumentar con la presencia de eventos de lluvia.

FIGURA 13. Presiones absoluta por el Diver y el CTD-Diver durante el mes de Diciembre de 2010

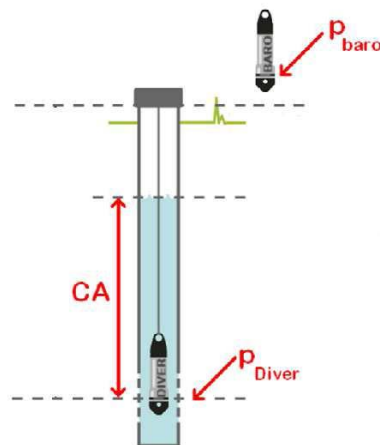


Al comparar el los registros de presiones del CTD-Diver con los del Diver, se encontró que el CTD-Diver está registrando datos con un desfase de 34 centímetros en promedio, sin embargo en la grafica anterior se puede apreciar como todos los cambio es en las presión se están registrando de manera idéntica en ambos dispositivos.

2.5. NIVELES DEL RIO.

Los niveles del río se calculan realizando una resta de presiones registradas por el Diver y el Baro Diver y conociendo la posición de los aparatos dentro del tubo Limnométrico.

FIGURA 14. Cálculo de Niveles del río.

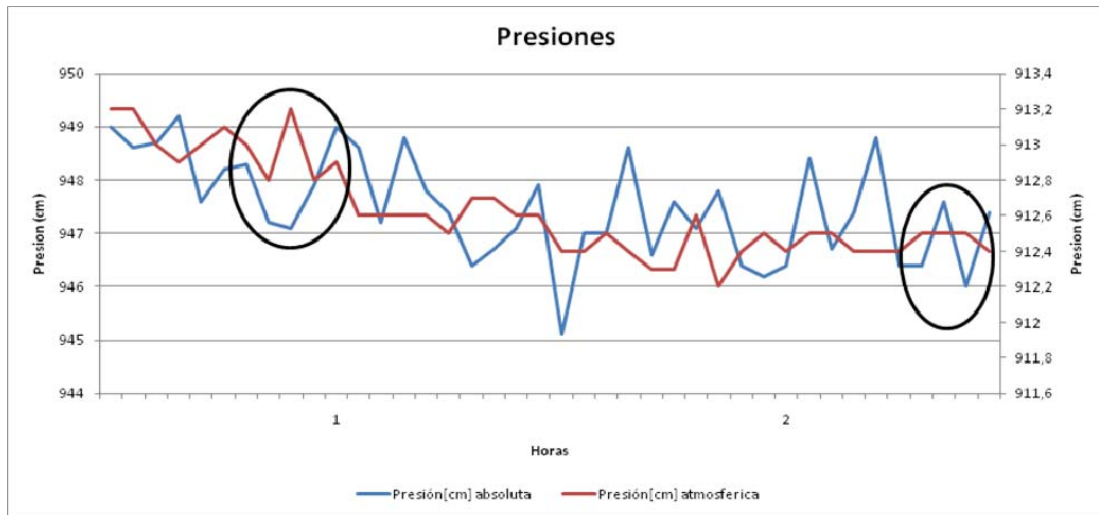


$$h(\text{cm}) = P_{\text{Diver}} - P_{\text{Baro}} + 17.5\text{cm}$$

Además de la resta de presiones se debe sumar a la columna de agua calculada la distancia del fondo del río al punto el cual el Diver está registrando que es 17,5 centímetros.

Al calcular los niveles del río se debe tener en cuenta que en el registro de presiones se suele presentar un error, como observamos en la siguiente gráfica, para cada dato se presenta una variación del Diver y del Baro Diver que en algunos puntos tienen el mismo sentido, pero en otros tiene sentido contrario. Esta variación de aproximadamente 5 mm del Baro y de 5 mm del Diver sumados da una variación de 1 cm que pueden generar pequeños errores al hallar la altura de agua correspondiente.

FIGURA 15. Error para cálculo de niveles del río



Los niveles mínimos de agua han sido registrados durante una recesión de aproximadamente 120 días alcanzando niveles de hasta 35 centímetros, con presencia de eventos de lluvia los niveles del agua varían de acuerdo con la intensidad del evento pudiendo llegar a un nivel hasta de 239 centímetros según los registros entre Diciembre del 2009 y Abril de 2010.

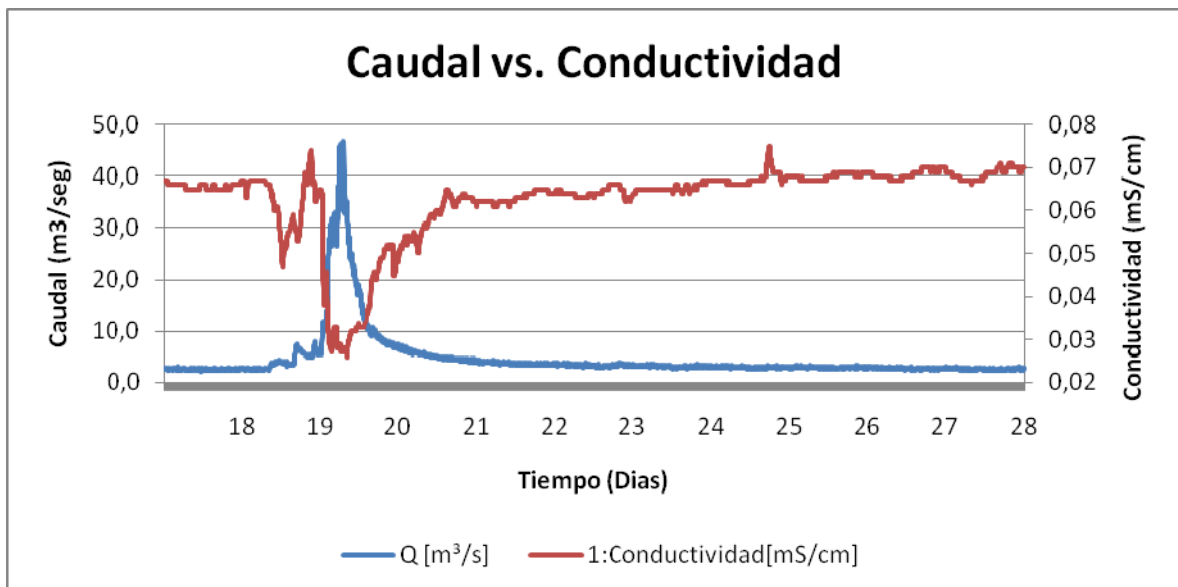
3. CORRELACION DE VARIABLES HIDRAULICAS Y FISICOQUIMICAS.

Por medio de la variación de la temperatura del agua, la temperatura ambiente, la conductividad eléctrica y el caudal se buscan identificar patrones entre sí que nos indiquen cambio en las condiciones habituales del río de Oro.

3.1. CORRELACION CAUDAL vs. CONDUCTIVIDAD ELECTRICA DEL AGUA.

A través de la gráfica se puede observar como el caudal y la conductividad eléctrica se relaciona entre sí en la época de invierno, cuando con la llegada de eventos de lluvia la conductividad empieza a descender de acuerdo al aumento del caudal.

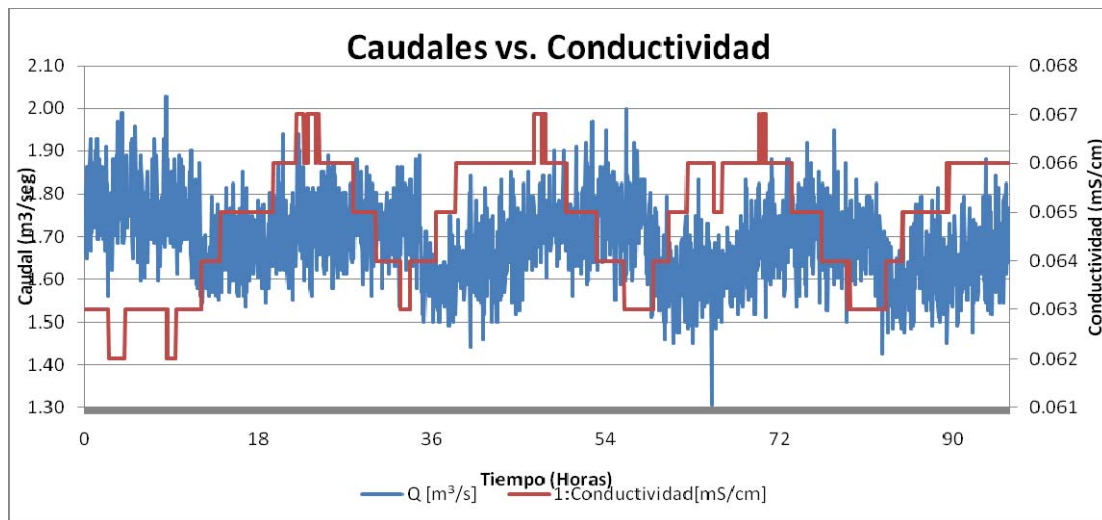
FIGURA 16. Correlación Caudal vs. Conductividad Eléctrica.



Duración del evento 63 horas

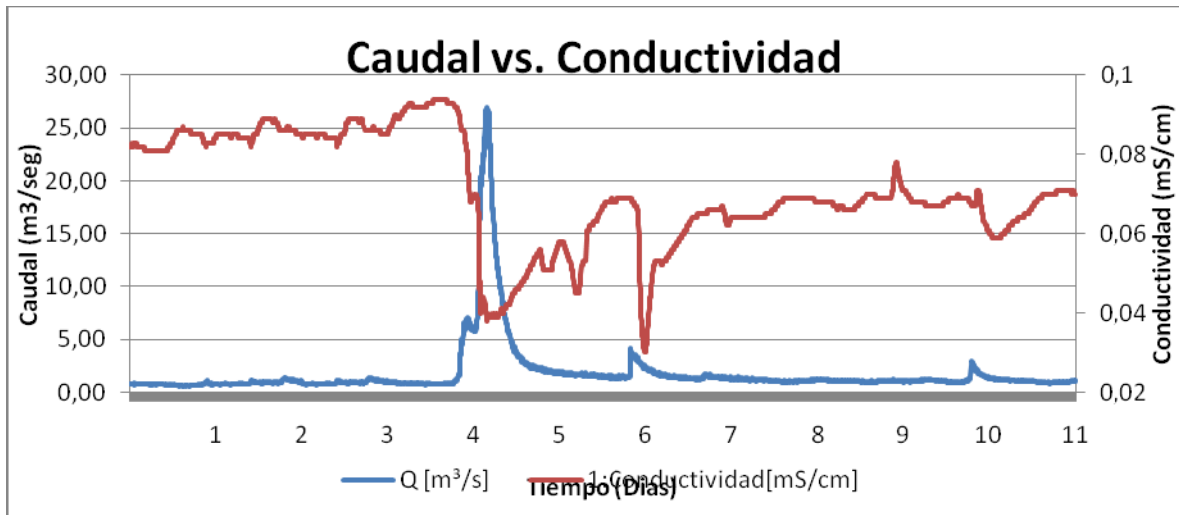
En la época de verano el caudal y la conductividad aparentemente tiene también una relación inversa sin embargo en esta etapa los cambios en la conductividad no van a ser generados por los cambios en el caudal sino por los cambios en la temperatura del agua como se explicara más adelante.

FIGURA 17. Hidrograma Caudal contra Conductividad (época de recesión)



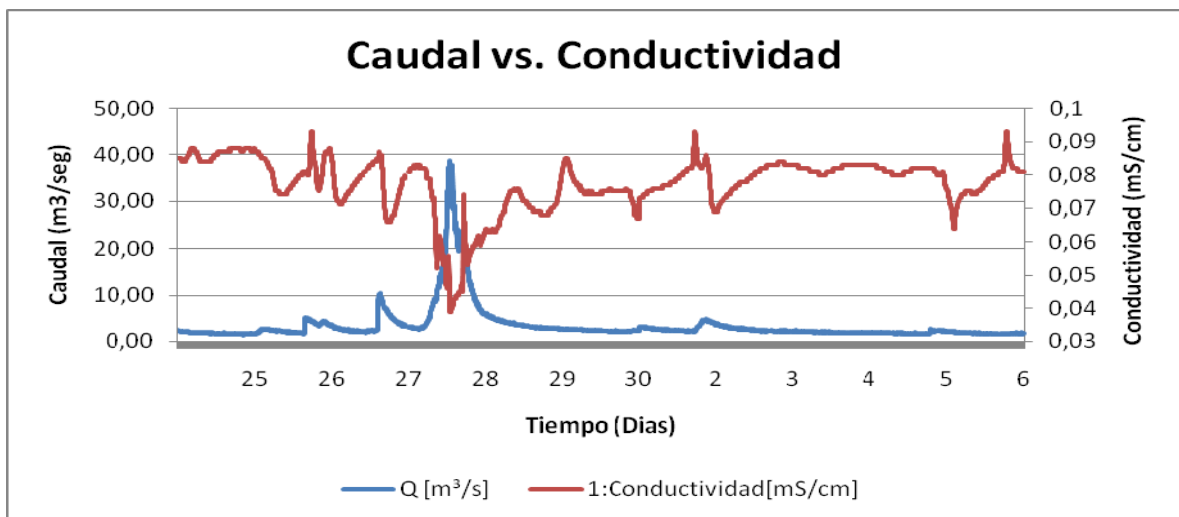
A continuación se presentan tres eventos en los que se pueden identificar claramente la relación inversa entre el caudal y la conductividad eléctrica durante un evento, y la poca incidencia que tiene los cambios de caudal sobre el ciclo diario de la conductividad eléctrica en época de verano. Además de presentar el tiempo de duración que tarda el río en recuperar el caudal base.

FIGURA 18. Evento Mayo 4 de 2010



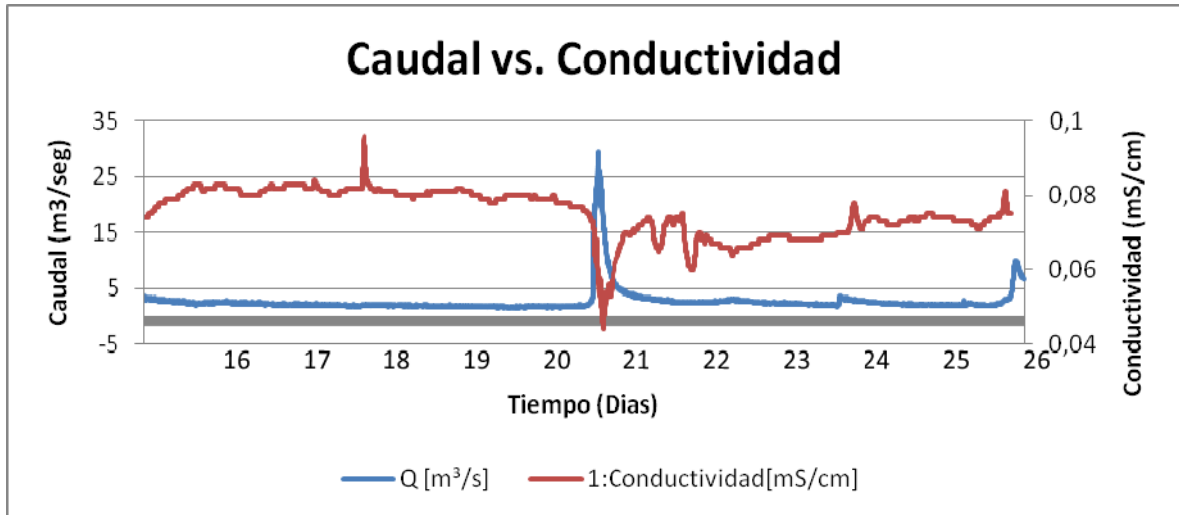
Duracion del evento 36 horas

FIGURA 19. Evento Mayo 27 de 2010



Duracion del evento 36 horas.

FIGURA 20. Evento 20 Junio 2010



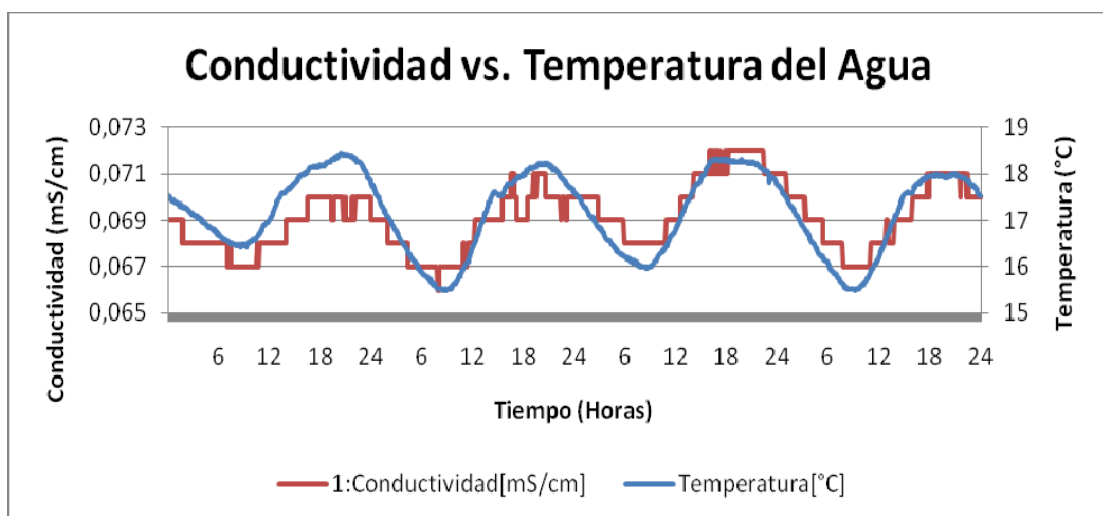
Duracion del evento 27 horas

3.2. CORRELACION TEMPERATURA DEL AGUA vs. CONDUCTIVIDAD ELECTRICA DEL AGUA.

La conductividad eléctrica del agua presenta variaciones en función de la temperatura del agua, los cambios en la temperatura influyen en la solubilidad de las sales y principalmente en la disociación de las sales disueltas (proceso general en el cual las moléculas o sales disueltas se separan en moléculas más pequeñas o iones, usualmente de manera reversibles) [6], y debido a que la variación de la conductividad eléctrica del agua está estrechamente ligada a los cambios en la concentración de materiales disueltos, principalmente a las sales disueltas en el agua, de esta manera se generan los cambios en la conductividad eléctrica que se ven principalmente reflejados en época de verano.

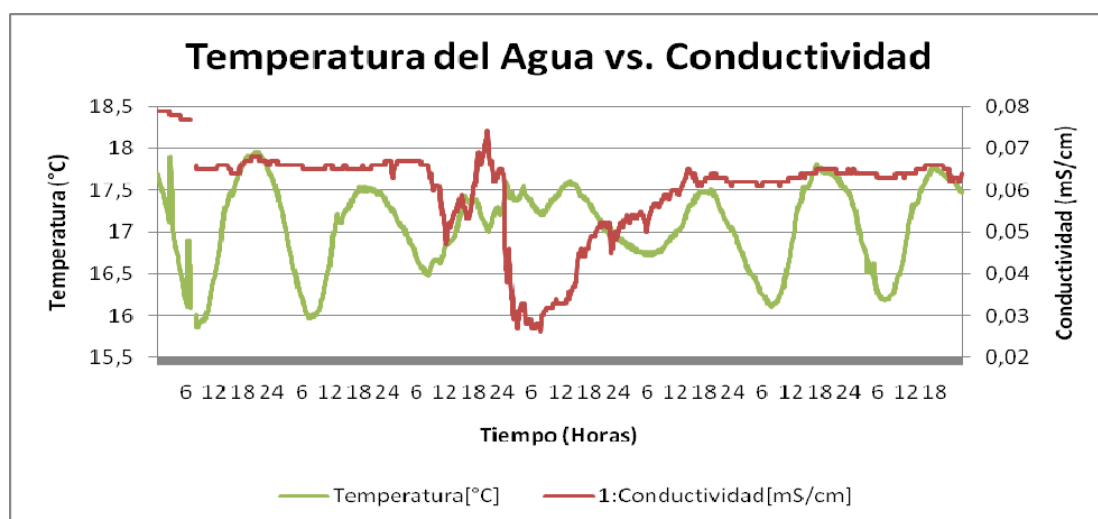
Durante la época de verano como se muestra en las siguientes graficas la temperatura del agua y la conductividad eléctrica tienen un comportamiento similar en el desarrollo de sus ciclos diarios lo que no indica una correlación directa entre ellas.

FIGURA 21. Correlación Temperatura del Agua vs. Conductividad Eléctrica (Verano)



Con la aparición de eventos de lluvias vemos como tanto la conductividad como la temperatura del agua ven afectados sus ciclos diarios, cada una expresando estos cambios de forma diferente. En el caso de la conductividad disminuyendo de acuerdo a la intensidad del evento y la temperatura alterando su ciclo diario de forma irregular.

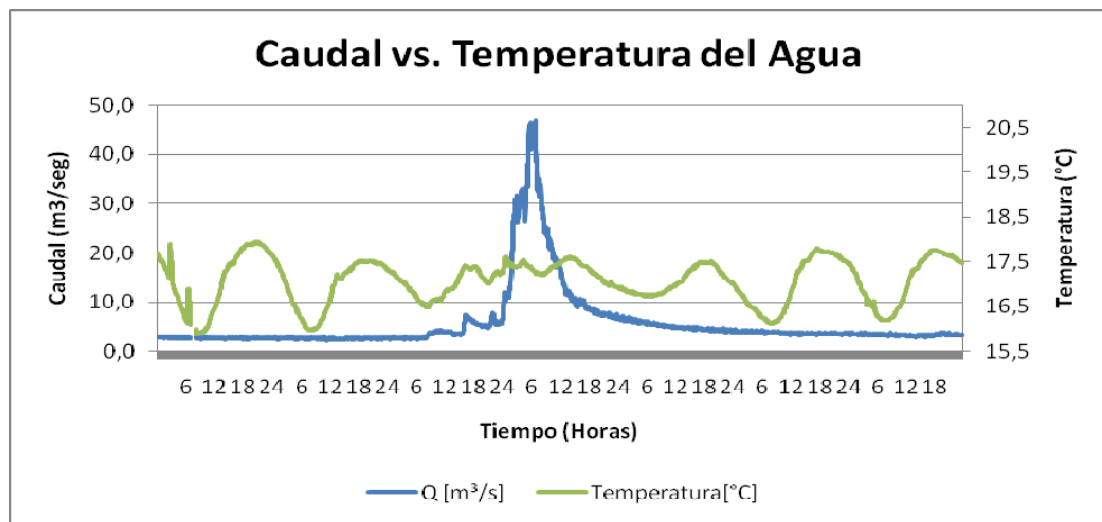
FIGURA 22. Correlación Temperatura del Agua vs. Conductividad Eléctrica.



3.3. CORRELACION CAUDAL vs. TEMPERATURA DEL AGUA

El caudal en época de verano no es una variable que afecte el comportamiento de la temperatura del agua, ya que en esta época las variaciones en la temperatura se deben básicamente a los cambios en la temperatura ambiente.

FIGURA 23. Correlación Caudal vs. Temperatura del Agua

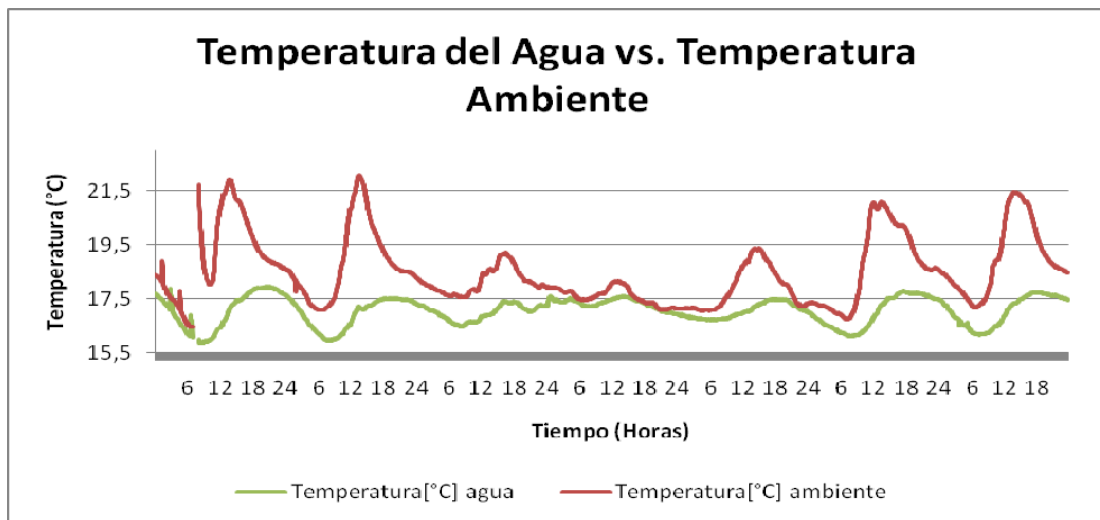


En el caso de la correlación caudal y temperatura podemos observar como los aumentos del caudal durante los eventos de lluvia coinciden justamente a las alteraciones del ciclo diario de la temperatura del agua, lo que nos puede servir como indicador respecto a las condiciones en el río.

3.4. CORRELACION TEMPERATURA AMBIENTE vs. TEMPERATURA DEL AGUA.

Claramente en la grafica se puede observa cómo tanto la temperatura ambiente como la temperatura del agua siguen el mismo ciclo diario durante la época de verano y con la aparición de eventos de lluvia las dos variables ven afectado su ciclo de la misma forma, lo que indica una relación directa entre las variables a pesar de existir un con un pequeño desfase debido al tiempo que tarda la temperatura en manifestarse en el agua.

FIGURA 24. Correlación Temperatura del Ambiente vs. Temperatura Agua.



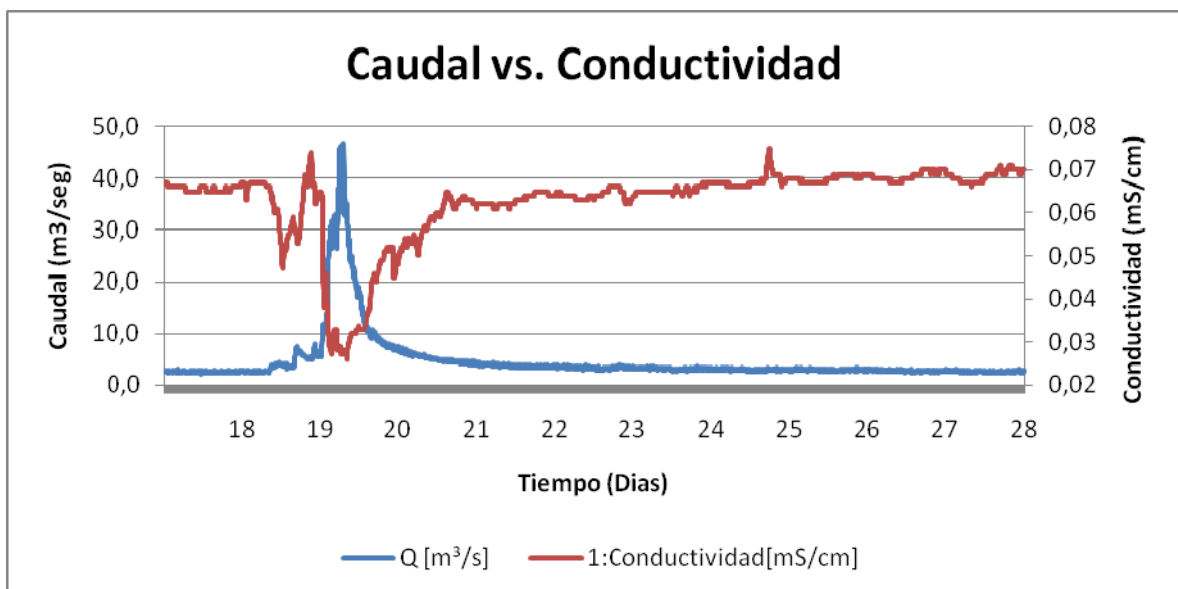
4. ANALISIS DE RESULTADOS.

Por medios de las pruebas realizadas en laboratorio respecto a la medición de conductividad eléctrica, el análisis de la información recogida y procesada, y las correlaciones planteadas se busca llegar a identificar posibles indicadores de cambios en las condiciones del río de Oro.

4.1. CORRELACIÓN CAUDAL VS. CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA DEL AGUA.

En épocas secas se observa que la conductividad eléctrica aumenta en la medida en que el caudal disminuye, es decir que al presentarse caudales máximos la conductividad será mínima.

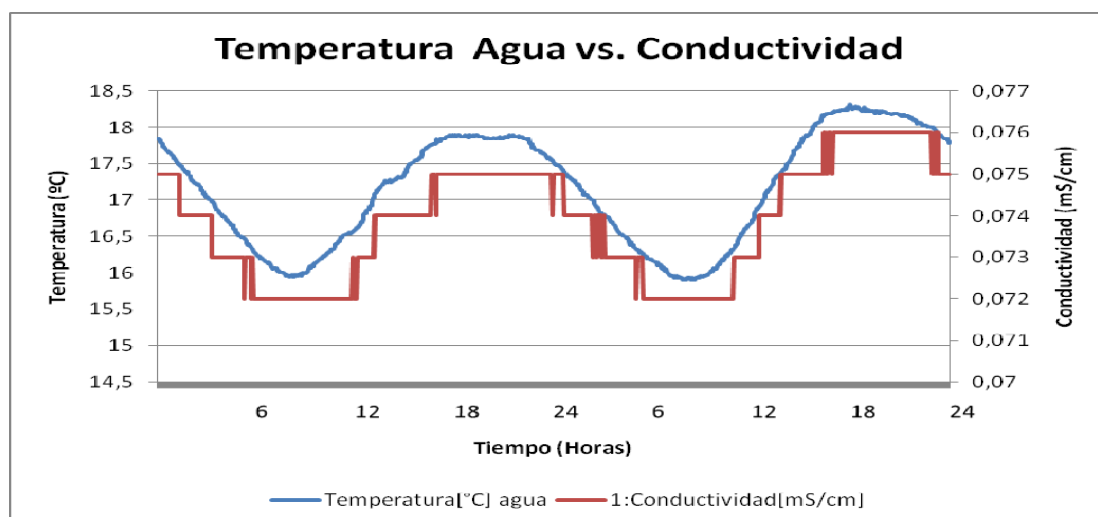
FIGURA 25. Análisis de Correlación Caudal vs. Conductividad.



4.2. CORRELACIÓN TEMPERATURA DEL AGUA VS. CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA DEL AGUA.

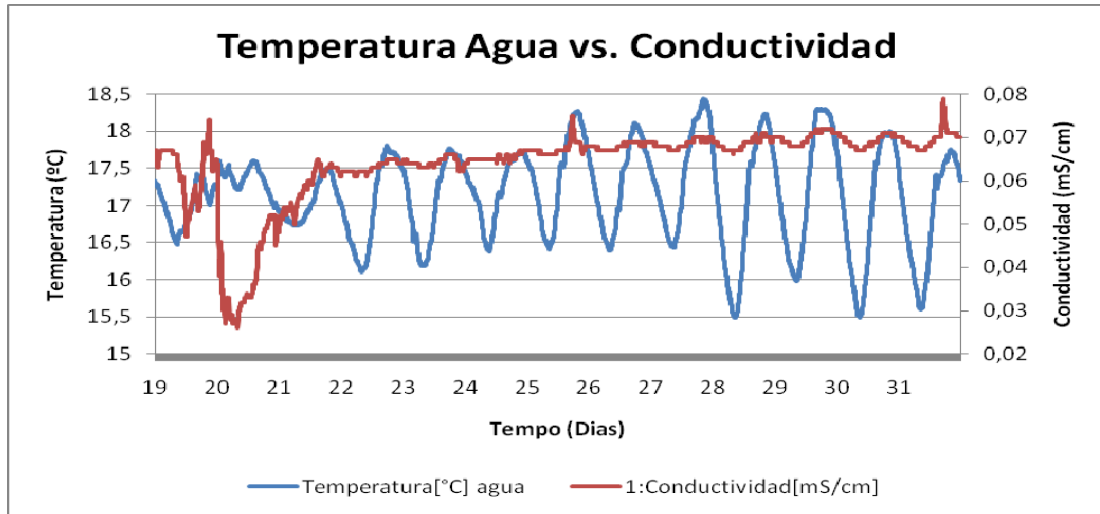
Con el aumento de la temperatura del agua aumenta la disociación de las sales disueltas en el agua generando un aumento en la conductividad eléctrica. Este efecto se puede ver reflejado claramente durante la época de verano en donde la conductividad varía directamente con la temperatura del agua.

FIGURA 26. Análisis de Correlación Temperatura del Agua vs. Conductividad Eléctrica.



La siguiente grafica corresponde al evento más grande registrado por los autores de este trabajo, que se ubica entre 19/12/2010 00:00 y 31/12/2010 23:57, en el cual podemos observar que la temperatura del agua y la conductividad durante el evento no se relacionan ya que la conductividad altera su ciclo diario disminuyendo bruscamente y la temperatura del agua distocionando su ciclo de forma irregular.

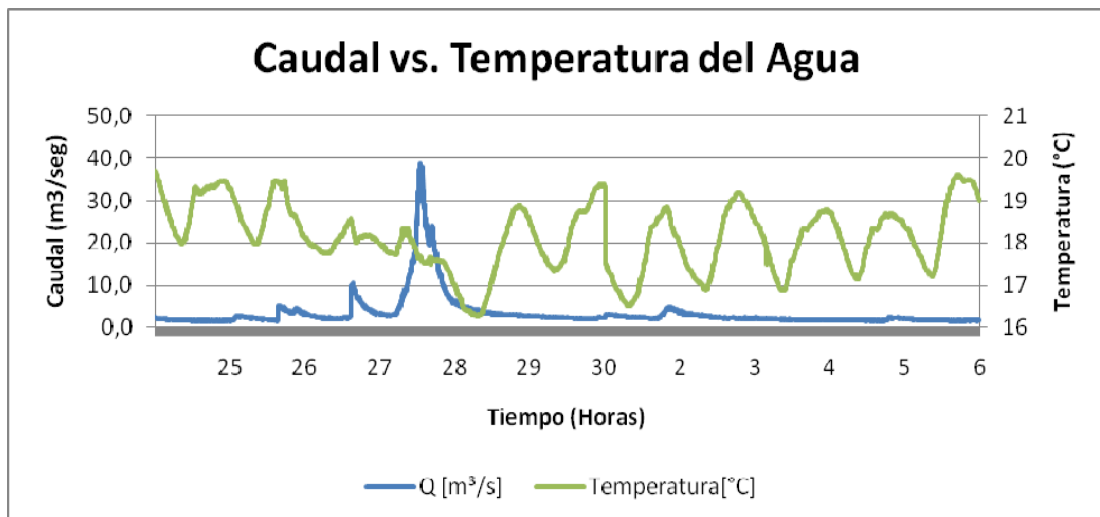
FIGURA 27. Análisis de Correlación Temperatura del Agua vs. Conductividad Eléctrica.



4.3. CORRELACIÓN CAUDAL VS. TEMPERATURA DEL AGUA.

La distorsión en el ciclo diario de la temperatura del agua coincide justamente con el aumento de los caudales debidos a eventos de lluvias en el rio de Oro, lo que puede permitir identificar por medio de los registros de temperatura agua periodos de tiempo en los cuales se debieron presentar variaciones en el caudal del rio.

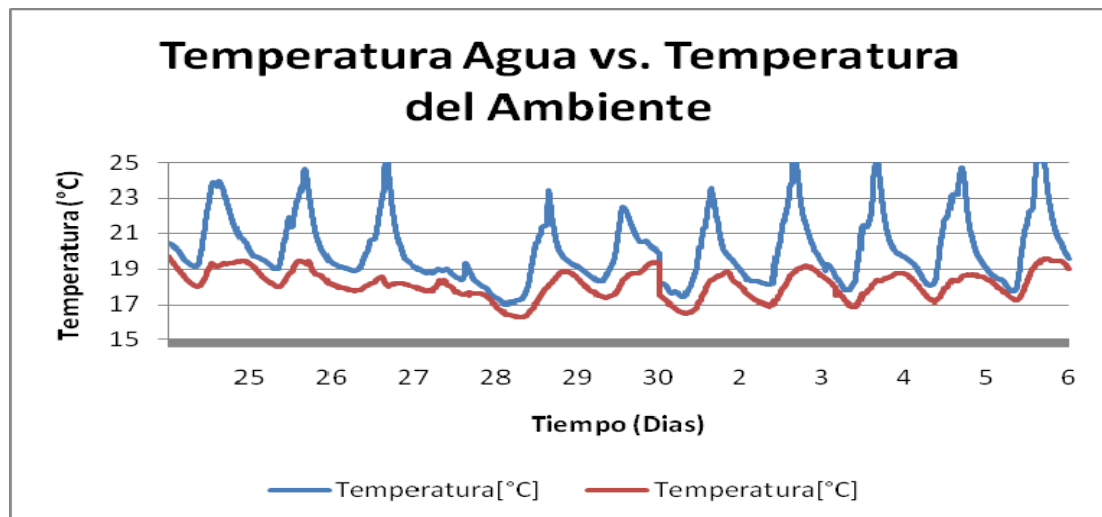
FIGURA 28. Análisis de correlación Caudal vs. Temperatura del Agua.



4.4. CORRELACIÓN TEMPERATURA DEL AGUA VS. TEMPERATURA AMBIENTE.

Independiente de la época, los registros de temperatura del agua varían directamente con la temperatura ambiente, manteniendo ciclos diarios similares, incluyendo durante los eventos de lluvia en donde a pesar de que los ciclos se distorsionan, la relación permanece directa.

FIGURA 29. Análisis de Correlación Temperatura del agua vs. Temperatura Ambiente.



4.5. CURVA DE CALIBRACION.

La curva de calibración es una relación en grafica del caudal y el nivel que presenta el rio a través del tiempo, esta se construye mediante la recolección de datos en campo en las distintas épocas del año para garantizar la veracidad y abarcar todas las posibles condiciones que se presenten en el rio.

Durante la ejecución de este trabajo se realizaron tres aforos intentando abarcar la distintas circunstancias del rio, sin embargo en algunos casos cuando se presentaban niveles altos en el rio se debían aplazar los aforos para garantizar la seguridad del equipo (ADV Flow-Tracker) y sus operadores, adicionalmente se contaba con 14 aforos realizados en trabajos anteriores (Saltarín & Hernández, Flórez & Rueda, 2008 y Aguilar & Caballero 2010), que aportan a la optimización de la curva de calibración.

Tabla 6. Aforos Anteriores.

AFOROS					
FECHA	HORA	H (cm)	Q (m ³ /seg)	Q1 formula (m ³ /seg)	Error %
10/04/2008	08:55:00 a.m.	51.02	1.968	20.775	5.58%
10/18/08	07:23:00 a.m.	60.86	3.418	32.976	3.52%
10/25/08	08:06:00 a.m.	48.82	2.004	18.439	8.01%
11/09/2008	08:14:00 a.m.	49.40	1.799	19.023	5.72%
11/27/08	10:20:00 a.m.	55.50	2.686	25.859	3.72%
11/27/08	09:32:00 a.m.	57.00	2.812	27.743	1.35%
12/14/08	09:01:00 a.m.	50.12	1.974	19.763	0.11%
12/19/08	08:06:00 a.m.	48.10	1.751	17.731	1.29%
01/09/2009	08:10:00 a.m.	45.12	1.400	14.979	6.99%
01/14/09	08:30:00 a.m.	44.30	1.367	14.272	4.43%
04/01/2009	09:00:00 a.m.	50.80	1.986	20.477	3.11%
01/23/10	08:30:00 a.m.	35.10	0.853	0.7725	9.47%
02/10/2010	08:00:00 a.m.	34.64	0.801	0.7461	6.86%
03/16/10	08:30:00 a.m.	32.16	0.735	0.6133	16.56%

Tabla 7. Aforos Nuevos.

AFOROS					
FECHA	HORA	H (cm)	Q (m ³ /seg)	Q1 formula (m ³ /seg)	Error %
12/17/10	08:30:00 a.m.	56,62	2,8443	2,7258	4,17%
01/23/11	08:00:00 a.m.	49,12	2,04	1,8739	8,14%
03/04/11	08:30:00 a.m.	52,79	2,45	2,26611	7,51%

En donde:

Q (m³/seg): corresponde a los caudales medidos con el ADV Flowtracker.

Q1 formula (m³/seg): corresponde a los caudales obtenidos con la fórmula:

$$Q = 1.067 * 10^{-4} * H^{2.816}$$

La curva de calibración se construye con los datos de la diferencia entre la presión leída del Diver y la presión atmosférica leída por el Baro-Diver, estos valores en centímetros se ubican en la ordenada. En la abscisa se tabulan los datos de caudal en m³/seg obtenidos de los aforos hechos en campo. Entonces para cada nivel de registrado habrá un caudal diferente.

FIGURA 30. Puntos Para la Regresión.

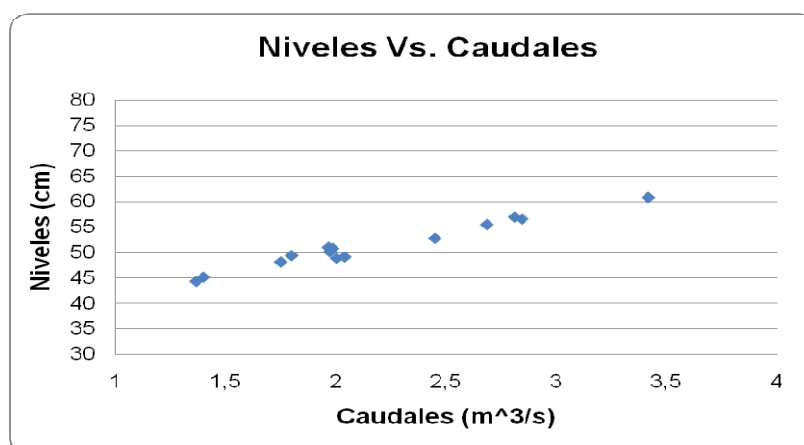
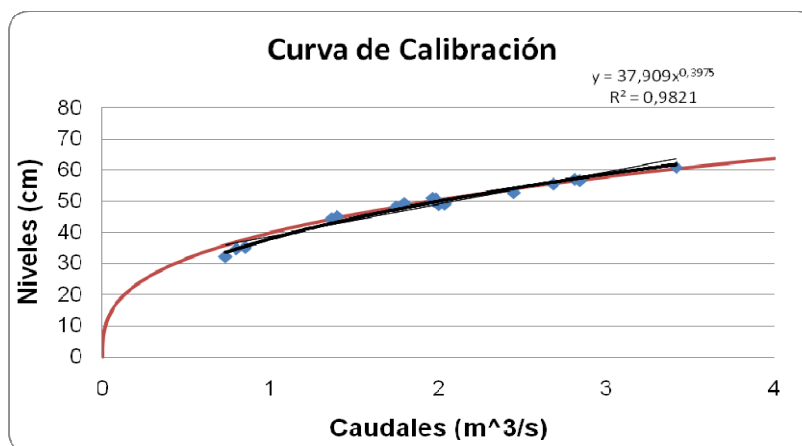


Tabla 8. Aforos para la nueva Curva de Calibración.

CURVA DE CALIBRACION		
FECHA	H (cm)	Q (m ³ /seg)
10/04/2008	51.02	1,968
10/18/08	60.86	3,418
10/25/08	48.82	2,004
11/09/2008	49.4	1,799
11/27/08	55.5	2,686
11/27/08	57	2,812
12/14/08	50.12	1,974
12/19/08	48.1	1,751
01/09/2009	45.12	1,400
01/14/09	44.3	1,367
04/01/2009	50.8	1,986
01/23/10	35.1	0,853
02/10/2010	34.64	0,801
03/16/10	32.16	0,735
12/17/10	56.62	2,844
01/23/11	49.12	2,040
03/04/11	52,79	2,450

FIGURA 31. Nueva Curva de Calibración.



La curva de calibración está basada en el uso del método logarítmico el cual se basa en la siguiente ecuación:

$$Q = K * H^n$$

En donde:

Constantes arrojadas por la regresión en Excel $K = 37.909$
 $n = 0.3975$

4.5.1. Descripción Sitio Para el Aforo.

El sitio para los aforos se ubica 30 metros aguas abajo de la estación automática. Se considera el más óptimo debido a que es un tramo de corriente recto con orillas paralelas, con lecho de corriente estable, porque no se presentan ninguna irregularidades relevantes y por no que no presenta obstrucciones considerables aguas arriba.

FIGURA 32. Sección Transversal para el aforo.



CONCLUSIONES

- En la estación automática del Río de Oro se tiene un CTD-Diver para registrar los cambios en la conductividad eléctrica del agua a través del tiempo cuyos datos se analizan en este proyecto. Para medir el error de los registros del equipo se realizaron pruebas en laboratorio comparando el equipo en campo (CTD-Diver) con un equipo como la sonda Multi-Paramétrica de contacto eléctrico tipo KII-Q-2 (equipo verificado anteriormente), lo que permitió establecer que el CTD-Diver registra datos de conductividad eléctrica para rangos inferiores a 1.413 mS/cm con un error de 1.55% a partir de la última calibración, error aceptable que se encuentra dentro del rango de las especificaciones del fabricante. Para conductividades superiores a 1.413 mS/cm presenta un mayor error, para minimizar este error habría que calibrar el CTD Diver en los cuatro puntos mencionados en Diver Office en el momento de la calibración.
- A partir de la información obtenida del Baro Diver, el Diver y el CTD-Diver en la estación automática del Río de Oro se analizó la información de caudales, conductividad eléctrica y temperatura en intervalos de tiempo de 3 minutos a partir del 21 de diciembre de 2009 hasta el 1 de abril de 2011, en donde se obtuvieron correlaciones entre las variables anteriores.
- Con base en la correlación Caudal vs. Conductividad Eléctrica, se puede establecer que la conductividad durante la época de verano mantiene un ciclo diario, en donde sus valores máximos se presentan constantes entre las 4 p.m. y la media noche, y los mínimos se registran entre las 8 a.m. y 9 a.m. Por otra parte durante la época de invierno la conductividad eléctrica varía dependiendo de la intensidad y duración del evento haciéndose notoria una

correlación inversa y bastante fuerte. Los registros de conductividad eléctrica también pueden ser utilizados como indicadores de flujo base debido a que durante la ausencia de eventos de lluvia la conductividad mantiene unos registros altos y con la llegada de los eventos empieza a descender de acuerdo a la magnitud del evento y posterior al evento de lluvia empieza a recuperar sus valores habituales, cortando en hidrograma en 2 puntos que pueden estar asociados al inicio y final de la escorrentía directa.

- En la correlación de Conductividad Eléctrica vs. Temperatura del Agua se comprueba que las dos variables mantienen ciclos diarios durante la época de verano, siendo la conductividad la variable que se ve afectada por la temperatura del agua, la cual está afectada por un sistema externo como es, el cambio en la temperatura ambiente en el transcurso del día. El ciclo diario de la temperatura del agua presenta la temperatura más bajo después de las 8 a.m. (siendo 14.23 el valor más bajo registrado), y el valor más alto se presenta pasando las 12 m. (21.5 °C el valor más alto registrado). En época de invierno la correlación Conductividad Eléctrica vs, Temperatura del Agua se hace prácticamente nula ya que en esta época los cambios en la conductividad son debidos a la variación en el caudal del rio generados por los eventos de lluvia. Con la correlación Conductividad Eléctrica vs. Temperatura del Agua se pueden identificar por medio de las alteraciones en los ciclos diarios de estas variables, los periodos de tiempo en los cuales ocurren eventos importantes de lluvias.
- Con el objeto de mejorar la curva de calibración del Rio de Oro se realizaron tres nuevos aforos (17 de Diciembre de 2010, 23 Enero de 2011 y 4 Marzo de 2011) a los 14 ya existentes, logrando así representar la variación de los caudales por medio de la ecuación

$Q = 1.056 * 10^{-4} * H^{2.819}$ con un coeficiente de correlación $R^2=0.982$, para valores de caudal medidos entre 0.7351 m³/s y 3.4179 m³/s, que es en el rango en el que se realizaron todos los aforos.

RECOMENDACIONES

- Para tener mayor confianza en cuanto a los registros de conductividad eléctrica, es recomendable calibrar el equipo periódicamente. Para garantizar que los registros se están realizando dentro del rango establecido por el patrón de calibración.
- Para que el CTD Diver pueda ser usado en aguas con conductividades altas y para que estos valores sean confiables es necesario calibrar el equipo para dicho rango ya que solo se encuentra calibrado para conductividades menores a 1.413 mS/cm.
- En busca de continuar alimentando y mejorando la curva de calibración se recomienda continuar con la realización aforos en las distintas épocas del año.
- Se recomienda verificar frecuentemente la programación de CTD-Diver en la medición de presiones para eliminar evitar posibles errores.
- A futuro es recomendable continuar con el estudio detallado de las relaciones entre los parámetros registrados en la estación automática del río de Oro, para utilizar estas relaciones como indicadores de cambios en las condiciones del río.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Aguilar Ardila, John Jairo & Caballero Ramírez, Cristian Ricardo (2010), Calibración e instalación de un CTD Diver en la estación hidrométrica automática del río de Oro. Bucaramanga, Universidad Industrial de Santander.
- [2] Díaz Ardila, Wilfredo Arturo & Rincon Hernández, William Yesid (2006), Montaje y calibración de una estación Hidrométrica automática para medición de niveles en el río de Oro. Bucaramanga, Universidad Industrial de Santander.
- [3] Ven Te Chow, Hidrología aplicada, Editorial Mc Graw Hill, 1994
- [4] Flórez Leal, Wilmer & Rueda Núñez, José Alfredo (2009); Curva de calibración y funcionamiento de la estación hidrométrica automática del río de Oro. Bucaramanga, Universidad Industrial de Santander.
- [5] Hernández Hernández, Laura Isabel & Saltarín Mesa, Diego Andrés (2007); Montaje operación y calibración de la estación hidrométrica automática para medición de niveles en el río de Oro, estación conquistador alto. Bucaramanga, Universidad Industrial de Santander.
- [6] Laboratorio Química Física- Clara Gómez, Remedios González, Rafael Viruela. http://ocw.uv.es/ciencias/1-1/teo_conductividad_nuevo.pdf
- [7] Normas Técnicas de Calidad del Agua Potable. Decreto 475 de 1998.
- [8] Pulido Ramos, Miguel Ángel & Nieto Cárdenas, Manuel Alejandro (2010), Obtención y análisis de perfiles de parámetros fisicoquímicos en piezómetros de la zona oriental de la ciudad de Bucaramanga. Bucaramanga, Universidad Industrial de Santander.

[9] SCHLUMBERGER Water Services by Van Essen Instruments BV (2006). Diver Product Manual <http://www.swstechnology.com>.

[10] Sistema para la Protección y Control de la Calidad del Agua para Consumo Humano. Decreto 1575 de 2007.

[11] Water Treatment Solutions Lenntech
<http://www.lenntech.es/aplicaciones/ultrapura/conductividad/conductividad-agua.htm> .