



UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA

Comunidad Educativa al servicio del Pueblo

**UNIDAD ACADÉMICA DE INGENIERÍA, INDUSTRIA Y
CONSTRUCCIÓN**

CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

**Modelación de la calidad de agua en la microcuenca del río
Tabacay perteneciente a la subcuenca del río Burgay**

**TRABAJO DE INVESTIGACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO AMBIENTAL**

AUTOR: CEDILLO MORALES NÉSTOR ISRAEL

DIRECTOR: ING. MATOVELLE BUSTOS CARLOS MARCELO MSc.

MATRIZ CUENCA

2017

DECLARACIÓN

Yo, Néstor Israel Cedillo Morales, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado en ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento; y eximo expresamente a la Universidad Católica de Cuenca y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

La Universidad Católica de Cuenca puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y la normatividad institucional vigente.

Néstor Israel Cedillo Morales

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Néstor Israel Cedillo Morales, bajo mi supervisión.

Ing. Carlos Matovelle Bustos MsC.

DIRECTOR

AGRADECIMIENTOS

Un agradecimiento sincero primero a Dios por permitirme estar donde estoy, y por darme las fuerzas necesarias para cada día acercarme un poco más a mi proyecto de vida y realizarme como profesional.

A mi universidad, la cual estimo mucho por abrirme sus puertas en su seno científico para poder estudiar mi carrera y por aceptarme ser parte de ella, forjándome día a día a dar pasos seguros en mi formación profesional con la ayuda indispensable de sus maestros de calidad.

A mi tutor Ing. Carlos Matovelle Bustos me gustaría expresarle un claro agradecimiento por su dedicación y esfuerzo que han posibilitado el desarrollo exitoso de este trabajo de graduación, deseándole suerte en cada uno de los proyectos que se trace durante su vida académica.

A las entidades públicas que me colaboraron sin interés alguno en la recopilación de datos para el desarrollo de este trabajo de modelación, mi sincera gratitud por el trabajo arduo que realizan día a día en la protección de los recursos naturales indispensables para la subsistencia de la vida en la Tierra.

A mis compañeros de la carrera de ingeniería ambiental de la Universidad Católica de Cuenca por la colaboración prestada en cada uno de las fases del modelo matemático.

Por último agradecer a mi familia de corazón, a mis padres y hermanos. La comprensión que han mostrado frente a mi trabajo y dedicación, pues la única meta en mi vida propuesta es no decrecer para que ustedes con esfuerzo mejoren mis pasos y vean que todo es posible con voluntad, dedicación y la ayuda indispensable de Dios. Quiero agradecer infinitamente a mis padres pilares fundamentales de mi carrera profesional por su comprensión, ayuda, ánimo que me han ofrecido, pues sin ellos mi trabajo no tendría sentido alguno.

Para finalizar recuerdo que todavía no soy ni la mitad de la persona que deseo ser...Aún tengo que trabajar mucho en mí. Soy mi proyecto más importante.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo de graduación a la facultad de ingeniería Ambiental de la Universidad Católica de Cuenca, esperando que cuyo trabajo sirva de guía para estudios mucho más precisos y técnicos sobre el desarrollo de modelos matemáticos con la ayuda del software "AQUATOOL" que contribuyan eficientemente a la protección y conservación de las fuentes hídricas amenazadas por las actividades antropogénicas.

"Mi máximo respeto y mi máxima admiración a todos los ingenieros, especialmente al mayor de todos ellos: DIOS".

ÍNDICE DE CONTENIDO

DECLARACIÓN	II
CERTIFICACIÓN	III
AGRADECIMIENTOS	IV
DEDICATORIA	V
ÍNDICE DE CONTENIDO	VI
LISTA DE FIGURAS	VIII
LISTA DE TABLAS	X
LISTA DE ECUACIONES	XII
LISTA DE ANEXOS	XII
RESUMEN	XIII
ABSTRACT	XIV
1. Objetivos.....	- 1 -
1.1 Objetivo General.....	- 1 -
1.2 Objetivos específicos	- 1 -
2. Marco Teórico.....	- 1 -
2.1 Introducción.....	- 1 -
2.2 La problemática de la calidad de agua en el medio rural.	- 3 -
2.3 La ciudad de Azogues.	- 4 -
2.4 Importancia de la microcuenca del río Tabacay.....	- 6 -
2.5 Contaminantes que intervienen en la modelación de la calidad de agua.	- 18 -
2.6 Modelos de Calidad de Agua como herramientas en la toma de decisiones.....	- 29 -
3. Análisis estadísticos del estado de la microcuenca del río Tabacay.....	- 32 -
3.1 Análisis de precipitaciones.....	- 32 -
3.2 Análisis de caudales.	- 36 -
3.3 Análisis de las variables de calidad.	- 44 -
4. Materiales y Métodos.....	- 66 -
4.1 Metodología de trabajo.....	- 67 -
4.2 Breve resumen sobre el Software Sistema Soporte de Decisión "AQUATOOL".- 73 -	- 73 -
4.3 Formulación del modelo.....	- 74 -

4.4	Tomas de muestras de agua.	- 75 -
5.	Desarrollo del modelo de calidad de agua.	- 77 -
5.1	Trabajo Autónomo de campo.	- 78 -
5.2	Análisis y recopilación de datos.	- 95 -
5.3	Software, Tratamiento y Gestión de Series Temporales Hidrológicas “TRASERO”.	- 101 -
5.4	Software, Evaluación de Recursos Hídricos “EvalHid”.	- 107 -
5.5	Desarrollo del modelo de calidad de agua en el software “AQUATOOL”.	- 119 -
5.6	Simulación.	- 128 -
5.7	Análisis de resultados y calibración.	- 129 -
5.8	Simular alternativas.	- 145 -
6.	Resultados.	- 154 -
6.1	Conclusiones.	- 154 -
6.2	Recomendaciones.	- 156 -
7.	Bibliografía.	- 158 -
8.	Anexos.	- 161 -

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1. Microcuenca del río Tabacay, plantas de tratamiento de aguas crudas</i>	- 5 -
<i>Figura 2. Ubicación geográfica de la microcuenca del río Tabacay</i>	- 7 -
<i>Figura 3. Comunidades que habitan dentro de la microcuenca del río Tabacay (Zonas de Influencia).</i> -	8 -
<i>Figura 4. Cuadro estacional de la población del cantón Azogues</i>	- 9 -
<i>Figura 5. Quebradas que conforman la microcuenca del río Tabacay</i>	- 12 -
<i>Figura 6. Conseciones de agua pertenecientes a la microcuenca del río Tabacay</i>	- 14 -
<i>Figura 7. Situación actual del río Burgay a su paso por la ciudad de Azogues</i>	- 16 -
<i>Figura 8. Situación actual de los canales de evacuación del área urbana</i>	- 16 -
<i>Figura 9. Vertidos directos de aguas residuales al río Burgay</i>	- 16 -
<i>Figura 10. Principales fuentes y consumos de oxígeno en un sistema natural</i>	- 22 -
<i>Figura 11. Esquema balance de materia</i>	- 30 -
<i>Figura 12. Estadística mensual de precipitaciones monitoreadas en la microcuenca del río Tabacay</i>	- 33 -
<i>Figura 13. Estadística anual de precipitaciones monitoreadas en la microcuenca del río Tabacay.</i> -	35 -
<i>Figura 14. Caudales mensuales medidos en la quebrada Llaucay</i>	- 37 -
<i>Figura 15. Caudales anuales medidos en la quebrada Llaucay</i>	- 39 -
<i>Figura 16. Valores promedios mensuales de los caudales registrados en la quebrada Cóndor Yacu</i> -	41 -
<i>Figura 17. Caudales anuales medidos en la quebrada Cóndor Yacu</i>	- 43 -
<i>Figura 18. Promedios de las concentraciones de sólidos suspendidos (Q. Llaucay)</i>	- 45 -
<i>Figura 19. Promedios de las concentraciones de sólidos suspendidos (Q. Cóndor Yacu)</i>	- 47 -
<i>Figura 20. Concentración de Sólidos Suspendidos en la quebrada Llaucay</i>	- 49 -
<i>Figura 21. Promedios de las concentraciones de oxígeno disuelto (Q. Llaucay)</i>	- 50 -
<i>Figura 22. Promedios de las concentraciones de oxígeno disuelto (Q. Cóndor Yacu)</i>	- 51 -
<i>Figura 23. Concentración Temporal de Oxígeno Disuelto de las quebradas Llaucay y Cóndor Yacu</i> -	53 -
<i>Figura 24. Promedios de las concentraciones de la DBO₅ (Q. Llaucay)</i>	- 55 -
<i>Figura 25 Promedios de las concentraciones de la DBO₅ (Q. Cóndor Yacu)</i>	- 56 -
<i>Figura 26. Concentración Temporal de DBO₅ para las quebradas de Llaucay y Cóndor Yacu sin eventos atípicos</i>	- 58 -
<i>Figura 27 Concentración de Amonio NH₄ para la quebrada Llaucay</i>	- 59 -
<i>Figura 28. Concentración de Amonio NH₄ para la quebrada Cóndor Yacu</i>	- 60 -
<i>Figura 29. Promedios de las concentraciones de nitratos (Q. Llaucay)</i>	- 62 -
<i>Figura 30. Promedios de las concentraciones de nitratos (Q. Cóndor Yacu)</i>	- 64 -
<i>Figura 31. Concentración de nitratos para las quebradas Llaucay y Cóndor Yacu.</i>	- 65 -
<i>Figura 32. Diagrama de flujo seguido para el desarrollo del modelo de calidad de agua</i>	- 69 -

<i>Figura 33. Captaciones de agua cruda dentro de las quebradas Llaucay y Cóndor Yacu</i>	<i>- 72 -</i>
<i>Figura 34. Estaciones de Monitoreo de calidad establecidas en el trabajo de campo</i>	<i>- 72 -</i>
<i>Figura 35. Componentes del Sistema de Soporte de Decisión "AQUATOOL".....</i>	<i>- 73 -</i>
<i>Figura 36. Quema de pastizales dentro de la microcuenca del río Tabacay.....</i>	<i>- 79 -</i>
<i>Figura 37. Puntos de monitoreo y control.....</i>	<i>- 81 -</i>
<i>Figura 38. Análisis de Sólidos Suspendedos en los tramos de la quebrada Llaucay</i>	<i>- 82 -</i>
<i>Figura 39. Análisis de la DBO₅ y del Oxígeno Disuelto en los tramos de la quebrada Llaucay.....</i>	<i>- 83 -</i>
<i>Figura 40 Análisis de Nitratos en los tramos de la quebrada Llaucay</i>	<i>- 85 -</i>
<i>Figura 41. Análisis de la Temperatura en los tramos de la quebrada Llaucay.....</i>	<i>- 86 -</i>
<i>Figura 42. Análisis del pH en los tramos de la quebrada Llaucay</i>	<i>- 87 -</i>
<i>Figura 43. Análisis de los Sólidos Suspendedos en los tramos de la quebrada Cóndor Yacu</i>	<i>- 88 -</i>
<i>Figura 44. Análisis de la DBO₅ y del Oxígeno Disuelto en los tramos de la quebrada Cóndor Yacu</i>	<i>- 90 -</i>
<i>Figura 45. Análisis de los Nitratos en los tramos de la Quebrada Cóndor Yacu</i>	<i>- 91 -</i>
<i>Figura 46. Análisis de la Temperatura en los tramos de la quebrada Cóndor Yacu.....</i>	<i>- 93 -</i>
<i>Figura 47. Análisis del pH en los tramos de la quebrada Cóndor Yacu</i>	<i>- 94 -</i>
<i>Figura 48. Estaciones meteorológicas dentro de la microcuenca del río Tabacay</i>	<i>- 97 -</i>
<i>Figura 49. Calculo de la lluvia útil, la ETP y la ETR mediante el software "TRASERO"</i>	<i>- 104 -</i>
<i>Figura 50: Desviación Acumulada correspondiente a las precipitaciones</i>	<i>- 105 -</i>
<i>Figura 51. Vista de un posible directorio de trabajo</i>	<i>- 110 -</i>
<i>Figura 52. Ventana de Opciones</i>	<i>- 111 -</i>
<i>Figura 53. Ventana para copiar los archivos de precipitación, ETP y temperatura</i>	<i>- 111 -</i>
<i>Figura 54. Ventana GIS. Agregar microcuenca seleccionada.....</i>	<i>- 112 -</i>
<i>Figura 55. Ventana principal una vez agregado la microcuenca del río Tabacay.....</i>	<i>- 112 -</i>
<i>Figura 56. Asignación del punto de desagüe a la microcuenca</i>	<i>- 113 -</i>
<i>Figura 57. Ventana principal. Asignación Múltiple de Parámetros.....</i>	<i>- 114 -</i>
<i>Figura 58. Asignar parámetros del modelo Témez para la microcuenca de la aportación PD_Superficial</i>	<i>- 114 -</i>
<i>Figura 59. Ventana principal. Resumen de Subcuencas.....</i>	<i>- 115 -</i>
<i>Figura 60. Ventana principal. Elección del tipo de resultados a representa</i>	<i>- 115 -</i>
<i>Figura 61. Resultados de las aportaciones de la microcuenca del río Tabacay</i>	<i>- 116 -</i>
<i>Figura 62. Esquema de la microcuenca del río Tabacay</i>	<i>- 120 -</i>
<i>Figura 63. Ficha de datos para la conducción tipo 1.....</i>	<i>- 121 -</i>
<i>Figura 64. Ventana de análisis de temperaturas</i>	<i>- 126 -</i>

<i>Figura 65. Parámetros referentes a la modelación de oxígeno disuelto, ciclo del nitrógeno y fitoplancton</i>	<i>- 127 -</i>
<i>Figura 66. Parámetros de los constituyentes de primer orden</i>	<i>- 128 -</i>
<i>Figura 67. Simulación de "SIMGES" para el periodo en el que se disponen los datos de calidad ...</i>	<i>- 129 -</i>
<i>Figura 68. Módulo "GESCAL" en funcionamiento</i>	<i>- 129 -</i>
<i>Figura 69. Comparativa de caudales en los tramos finales de las quebradas</i>	<i>- 134 -</i>
<i>Figura 70. Comparativa de valores de oxígeno disuelto simulados y calibrados (Quebrada Llaucay).....</i>	<i>- 136 -</i>
<i>Figura 71. Comparativa de valores de oxígeno disuelto simulados y calibrados (Quebrada Cóndor Yacu) -</i>	<i>136 -</i>
<i>Figura 72. Comparativa de valores de DBO₅ simulados y calibrados (Quebrada Llaucay).....</i>	<i>- 138 -</i>
<i>Figura 73. Comparativa de valores de la DBO₅ simulados y calibrados (Quebrada Cóndor Yacu)..</i>	<i>- 138 -</i>
<i>Figura 74. Procesos considerados en la modelación de oxígeno disuelto junto con el ciclo del nitrógeno..</i>	<i>- 139 -</i>
<i>Figura 75. Comparativa de los valores del Nitrógeno Orgánico simulados y calibrados (Quebrada Llaucay). -</i>	<i>140 -</i>
<i>Figura 76. Comparativa de los valores del Nitrógeno Orgánico simulados y calibrados (Quebrada Cóndor Yacu)-</i>	<i>140 -</i>
<i>Figura 77. Comparativa de los valores del Amonio simulados y calibrados (Quebrada Llaucay)....</i>	<i>- 141 -</i>
<i>Figura 78. Comparativa de los valores del Amonio simulados y calibrados (Quebrada Cóndor Yacu)....</i>	<i>- 142 -</i>
<i>Figura 79. Comparativa de los valores de Nitratos simulados y calibrados (Quebrada Llaucay)....</i>	<i>- 143 -</i>
<i>Figura 80. Comparativa de los valores de Nitratos simulados y calibrados (Quebrada Cóndor Yacu) ..</i>	<i>- 143 -</i>
<i>Figura 81. Comparativa de los valores de Sólidos Suspendidos simulados y calibrados (Quebrada Llaucay)-</i>	<i>144 -</i>
<i>Figura 82. Comparativa de los valores de Sólidos Suspendidos simulados y calibrados (Quebrada Cóndor Yacu)-</i>	<i>145 -</i>
<i>Figura 83. Comparativa de los caudales de las quebradas Llaucay y Cóndor Yacu</i>	<i>- 146 -</i>
<i>Figura 84. Escenarios_ Oxígeno Disuelto</i>	<i>- 147 -</i>
<i>Figura 85. Escenarios_ DBO₅</i>	<i>- 148 -</i>
<i>Figura 86. Escenarios Nitrógeno Orgánico.....</i>	<i>- 149 -</i>
<i>Figura 87. Escenarios Nitrógeno Amoniacal</i>	<i>- 150 -</i>
<i>Figura 88. Escenarios Nitratos.....</i>	<i>- 151 -</i>
<i>Figura 89. Escenarios Sólidos Suspendidos</i>	<i>- 152 -</i>

LISTA DE TABLAS

<i>Tabla 1. Área, perímetro y caudal específico de las quebradas que conforman la microcuenca del río Tabacay.</i>	<i>- 12 -</i>
<i>Tabla 2. Usos y caudales de agua de la microcuenca del río Tabacay.....</i>	<i>- 14 -</i>
<i>Tabla 3. Variación de la concentración de oxígeno en relación a la temperatura.....</i>	<i>- 21 -</i>

<i>Tabla 4. Cinéticas de reacción de la Temperatura</i>	<i>- 27 -</i>
<i>Tabla 5. Valores de precipitación en (mm) para la microcuenca del río Tabacay</i>	<i>- 32 -</i>
<i>Tabla 6. Estadística mensual de precipitaciones.....</i>	<i>- 33 -</i>
<i>Tabla 7. Estadística anual de precipitaciones</i>	<i>- 35 -</i>
<i>Tabla 8. Estadística mensual de caudales registrados en la quebrada Llaucay.....</i>	<i>- 37 -</i>
<i>Tabla 9. Estadística anual de los caudales registrados en la quebrada Llaucay.....</i>	<i>- 39 -</i>
<i>Tabla 10. Estadística mensual de los caudales registrados en la quebrada Cóndor Yacu</i>	<i>- 41 -</i>
<i>Tabla 11. Estadística anual de los caudales registrados en la quebrada Cóndor Yacu.....</i>	<i>- 42 -</i>
<i>Tabla 12. Valores estadísticos mensuales de concentración de sólidos suspendidos (Q.Llaucay)....</i>	<i>- 45 -</i>
<i>Tabla 13. Valores estadísticos mensuales de concentración de sólidos suspendidos (Q. Cóndor Yacu).....</i>	<i>- 47 -</i>
<i>Tabla 14 Valores estadísticos mensuales de concentración de oxígeno disuelto (Q. Llaucay)</i>	<i>- 50 -</i>
<i>Tabla 15 Valores estadísticos mensuales de concentración de oxígeno disuelto (Q. Cóndor Yacu) -</i>	<i>51 -</i>
<i>Tabla 16. Valores estadísticos mensuales de la DBO₅ (Q. Llaucay).....</i>	<i>- 54 -</i>
<i>Tabla 17. Valores estadísticos mensuales de la DBO₅ (Q. Llaucay).....</i>	<i>- 56 -</i>
<i>Tabla 18. Valores estadísticos mensuales de concentración de nitratos (Q. Llaucay).....</i>	<i>- 62 -</i>
<i>Tabla 19 Valores estadísticos mensuales de concentración de nitratos (Q. Cóndor Yacu).....</i>	<i>- 63 -</i>
<i>Tabla 20. Coordenadas de las captaciones de agua</i>	<i>- 72 -</i>
<i>Tabla 21. Coordenadas de las estaciones de monitoreo de calidad</i>	<i>- 72 -</i>
<i>Tabla 22. Valores de los Sólidos Suspendidos medidos en los ICAS (Q.Llaucay)</i>	<i>- 82 -</i>
<i>Tabla 23. Valores de la DBO₅ y Oxígeno Disuelto medidos en los ICAS (Q. Llaucay).....</i>	<i>- 83 -</i>
<i>Tabla 24. Valores de los Nitratos medidos en los ICAS (Q.Llaucay)</i>	<i>- 85 -</i>
<i>Tabla 25. Valores de las Temperaturas medidas en los ICAS (Q. Llaucay)</i>	<i>- 86 -</i>
<i>Tabla 26. Valores del pH medidos en los ICAS (Q.Llaucay)</i>	<i>- 87 -</i>
<i>Tabla 27. Valores de los Sólidos Suspendidos medidos en los ICAS (Q. Cóndor Yacu)</i>	<i>- 88 -</i>
<i>Tabla 28. Valores de la DBO₅ y del Oxígeno Disuelto medidos en los ICAS (Q. Cóndor Yacu)</i>	<i>- 89 -</i>
<i>Tabla 29. Valores de los Nitratos medidos en los ICAS (Q. Cóndor Yacu)</i>	<i>- 91 -</i>
<i>Tabla 30. Valores de la Temperatura medidos en los ICAS (Q. Cóndor Yacu).....</i>	<i>- 92 -</i>
<i>Tabla 31. Valores del pH medidos en los ICAS (Q. Cóndor Yacu).....</i>	<i>- 94 -</i>
<i>Tabla 32. Información de las Estaciones Meteorológicas.....</i>	<i>- 96 -</i>
<i>Tabla 33. Precipitaciones en mm (Llenado de datos faltantes)</i>	<i>- 100 -</i>
<i>Tabla 34. Resultados de los análisis realizados con el software "TRASERO"</i>	<i>- 106 -</i>
<i>Tabla 35. Valores mensuales de las aportaciones de la microcuenca del río Tabacay.....</i>	<i>- 116 -</i>
<i>Tabla 36. Aportaciones de las quebradas que conforman la microcuenca del río Tabacay</i>	<i>- 118 -</i>
<i>Tabla 37. Proporcionalidades de aportaciones</i>	<i>- 123 -</i>

<i>Tabla 38. Elementos conducción-Modelo calidad de Agua.....</i>	<i>- 124 -</i>
<i>Tabla 39. Relación entre los puntos de medición, y resultados del modelo para comparación</i>	<i>- 131 -</i>

LISTA DE ECUACIONES

<i>Ecuación 1. Descenso de la presión atmosférica.....</i>	<i>- 22 -</i>
<i>Ecuación 2. Corrección por temperatura.....</i>	<i>- 27 -</i>
<i>Ecuación 3. Balance de materia</i>	<i>- 30 -</i>
<i>Ecuación 4. Modelo simplificado de la ecuación general de conservación de la materia, sistema unidimensional</i>	<i>- 31 -</i>
<i>Ecuación 5. Modelo simplificado de la ecuación general de conservación de la materia, sistema unidimensional sin transporte dispersivo.....</i>	<i>- 32 -</i>
<i>Ecuación 6. Regresión Lineal</i>	<i>- 98 -</i>
<i>Ecuación 7. Coeficiente de correlación.....</i>	<i>- 100 -</i>
<i>Ecuación 8. Ecuación de Arrhenius.....</i>	<i>- 126 -</i>
<i>Ecuación 9. Fórmula de Owens-Gibbs</i>	<i>- 132 -</i>

LISTA DE ANEXOS

<i>Anexo 1. Evidencia de las salidas de campo.....</i>	<i>- 161 -</i>
<i>Anexo 2. Toma de muestras de agua para análisis de las variables de calidad.</i>	<i>- 162 -</i>
<i>Anexo 3. Solicitud de petición de datos hidrológicos referentes a la microcuenca del río Tabacay dirigido a "SENAGUA"</i>	<i>- 163 -</i>
<i>Anexo 4. Formato de la cadena de custodia para la toma de muestras de agua.....</i>	<i>- 164 -</i>
<i>Anexo 5. Formato de registro de salidas de campo.</i>	<i>- 165 -</i>
<i>Anexo 6. Formato de registro de medición de los caudales.....</i>	<i>- 166 -</i>
<i>Anexo 7. Formatos Digital.....</i>	<i>- 167 -</i>

RESUMEN

El objetivo de este trabajo de investigación es diseñar un modelo matemático que involucre la parte de gestión así como la de calidad de agua ajustado a la dinámica hidrológica de la microcuenca del río Tabacay perteneciente al cantón Azogues, para de esta manera ofrecer una herramienta de ayuda que contribuya a la conservación y protección de este recurso hídrico que abastece de agua dulce a la población azogueña tanto del área urbana como rural. Un modelo matemático que represente la realidad de la dinámica y calidad hidrológica de la microcuenca y que con la ayuda de simulaciones de escenarios futuros sea posible proponer alternativas de solución que sean social y económicamente justas, a la vez sean ambientalmente sustentables frente a los problemas de contaminación que aqueja a este sistema natural. La modelación ambiental se realizó con la ayuda del software "AQUATOOL" específicamente en las quebradas Llaucay y Cóndor Yacu pertenecientes a las microcuenca del río Tabacay por ser los cursos hídricos de mayor contraste de escenarios dentro de este sistema natural.

Palabras clave: MODELO MATEMÁTICO, CALIDAD DE AGUA, ÁREA URBANA, CALIDAD HIDROLÓGICA, MICROCUENCA DEL RÍO TABACAY, SOFTWARE AQUATOOL.

ABSTRACT

The objective of this research is to design a mathematical model involving the management and water quality, set to the hydrological dynamics of the micro watershed of the river Tabacay belonging to the Azogues canton, and thereby provide a helpful tool that contributes to the conservation and protection of this water resource which supplies fresh water to the population in urban and rural areas. A mathematical model that represents the reality of the hydrological dynamics and quality of the micro watershed and with the help of simulations of future scenarios it is possible to propose alternative solutions that are socially and economically reasonable, while being environmentally sustainable against pollution problems afflicting this natural system. The environmental modeling was carried out with the help of the "AQUATOOL" software, specifically in the Llaucay and Cóndor Yacu streams belonging to the micro watershed of the Tabacay River and for being water courses with higher contrast scenarios within this natural system.

Keywords: MATHEMATICAL MODEL, WATER QUALITY, URBAN AREA, HYDROLOGICAL QUALITY, MICRO WATERSHED OF THE TABACAY RIVER, AQUATOOL SOFTWARE.

MODELACIÓN DE LA CALIDAD DE AGUA EN LA MICROCUENCA DEL RÍO TABACAY PERTENECIENTE A LA SUBCUENCA DEL RÍO BURGAY

1. Objetivos.

1.1 Objetivo General.

Diseñar un modelo ambiental de calidad de agua ajustado a la dinámica hidrológica de las quebradas Llaucay y Cóndor Yacu, pertenecientes a la microcuenca del río Tabacay para la determinación de su calidad hídrica.

1.2 Objetivos específicos.

- Diagnosticar el estado de la calidad del recurso hídrico mediante indicadores obtenidos en pruebas analíticas, a través del análisis de diferentes parámetros de calidad de agua como son sólidos suspendidos, demanda biológica de oxígeno, nitratos, oxígeno disuelto, temperatura y potencial de hidrógeno.

- Desarrollar un modelo computacional matemático ajustado a la realidad que permita simular la evolución de los parámetros: sólidos suspendidos, demanda biológica de oxígeno, nitrógeno orgánico, nitrógeno amoniacal, nitratos, oxígeno disuelto y temperatura.

- Simular escenarios futuros en condiciones ambientales propuestas, con la ayuda del modelo calibrado y ajustado con el fin de proponer alternativas de gestión adecuadas para el recurso hídrico en estudio.

2. Marco Teórico.

2.1 Introducción.

En la actualidad la contaminación de las fuentes de agua natural es un problema que aqueja a los gobiernos nacionales y locales, pues el aumento de la población y las pérdidas de fuentes de agua natural han hecho que las entidades encargadas de la protección de los sistemas hídricos busquen soluciones factibles y económicamente rentables ante el deterioro de la calidad de los recursos hídricos, pues un efecto negativo sobre la calidad de agua influirá directamente sobre el estilo de vida de su población.

El agua ha desempeñado un papel fundamental para el desarrollo de diversas civilizaciones. La sociedad se beneficia ampliamente de los servicios ambientales del agua proveniente de acuíferos, ríos, lagos o costas, y por consiguiente el ser humano ejerce una influencia directa o indirecta sobre ellos y su biota acuática (Brown, 2003). Reconocer y valorar esos servicios puede evitar la degradación ambiental, sobre todo en momentos de alto crecimiento poblacional y mayor presión territorial (Sandra L. Postel and Barton H. Thompson, 2005). Por lo tanto, la prosperidad de una sociedad depende en gran medida de

su capacidad para utilizar, proteger y regenerar sus recursos hídricos (el agua en un sentido puramente físico) y acuáticos (la biodiversidad acuática).

El proyecto pretende realizar la modelación de la calidad de agua en las quebradas de Llaucay y Cóndor Yacu pertenecientes a la microcuenca del río Tabacay, empleando el software hidrológico "AQUATOOL" junto con su módulo "GESCAL" (calidad de agua) y su módulo "SIMGES" (gestión del recurso hídrico) para la modelación de contaminantes físicos y químicos como son los sólidos suspendidos, demanda biológica de oxígeno, nitrógeno orgánico, amonio, nitratos, oxígeno disuelto y la temperatura, utilizando técnicas de recopilación de datos bibliográficos y de campo, análisis de laboratorio y modelos matemáticos similares. Al diseñar un modelo ambiental acoplado a la realidad hidrológica de la microcuenca del río Tabacay, se podrá crear sistemas de alerta temprana que respondan eficientemente ante diferentes eventualidades que podrían darse dentro de este curso hídrico, implementando medidas inmediatas de gestión ambiental.

El modelo a desarrollar no debe intentar representar la evolución de la calidad de agua frente a eventos puntuales, sino por lo contrario debe intentar reflejar la evolución espacio temporal de la calidad de agua en los sistemas modelados, fruto de las diferentes alternativas de gestión, depuración, contaminación y uso del recurso. (Paredes, 2004)

El trabajo de investigación explica en cada uno de sus apartados la importancia de preservar esta microcuenca, datos importantes sobre el diseño del modelo matemático, información referente al manejo software libre a utilizar, la metodología utilizada para desarrollar este trabajo de investigación, análisis de los resultados del modelo diseñado, se enuncia las conclusiones referentes a los resultados del modelo matemático y por último se propone recomendaciones para estudios hidrológicos posteriores sobre la microcuenca del río Tabacay.

La microcuenca del río Tabacay es de suma importancia para la población azogueña, ya que de esta captan sus aguas para las diversas actividades que realizan día a día. En la actualidad sus fuentes aguas se han visto alteradas por las actividades antropogénicas que se realizan en sus riveras, sin contar con la ganadería y agricultura que con el paso del tiempo van degradando este ecosistema frágil, haciéndole que el mismo pierda su capacidad de autodepuración, llevando a que con el paso de los días sea más complicado implementar un proceso de gestión ambiental con base en la conservación y protección de esta microcuenca.

Como ayuda ante esta problemática se busca desarrollar un modelo matemático ajustado a la realidad hídrica de la microcuenca del río Tabacay. Un modelo ambiental que sirva como herramienta de ayuda para implementar un sistema de gestión ambiental técnico,

donde se controlen todas las variables ambientales del lugar e involucre a los actores sociales que dependen de este sistema hidrológico. Además, con el modelo matemático a desplegar se contará con un sistema de alerta temprana que prediga situaciones futuras ya sean estas positivas o negativas, permitiendo actuar anticipadamente ante tales eventualidades.

La metodología utilizada básicamente reside en la recopilación de datos hidrológicos y climáticos sobre esta microcuenca, toma de muestras de agua para análisis de laboratorio, confrontación de datos obtenidos y simulación de escenarios propuestos cuya finalidad es conocer el estado del sistema hídrico de la microcuenca y proponer alternativas de solución orientadas hacia una gestión ambiental eficiente.

Planear una política de gestión adecuada en una determinada cuenca es tener la capacidad de adoptar soluciones que sean efectivas y con una óptima relación costo/eficacia. Así también se pueden diseñar soluciones que sean estructurales y no estructurales para alcanzar los niveles de calidad que exigen las normativas según los usos para los cuales vaya a ser destinado este recurso. (Matovelle, 2015)

2.2 La problemática de la calidad de agua en el medio rural.

Se estima que en América Latina y el Caribe 43% de la población rural no tiene acceso al abastecimiento de agua con una calidad apropiada para el consumo humano y para usos domésticos como la higiene personal (D, 1996)

Por otro lado, se ha demostrado que las enfermedades hidrotansmisibles como la gastroenteritis, la fiebre tifoidea, la hepatitis A y el cólera, entre otras, están entre las principales causas de muerte en los países de América Latina. Hay una relación directa entre la mortalidad infantil y la cobertura de agua de buena calidad para consumo humano debido a que los niños son especialmente propensos a enfermarse.

Una de las enfermedades causadas por la ingesta de agua contaminada es la diarrea, esta se considera como una de las primeras causas de muerte entre los niños de 1 y 4 años de edad, con dos millones de defunciones al año en todo el mundo (Piza, 1996). Los niños menores de 5 años aún no tienen completo el sistema inmunológico y en los países en vías de desarrollo, la mayor parte de ellos están afectados por la desnutrición. En general, la diarrea es transitoria en las personas bien alimentadas y persistentes en las mal nutridas. La infección repetitiva puede aumentar la desnutrición, que, a su vez, incrementa la vulnerabilidad ante nuevas infecciones.

Las comunidades rurales se encuentran en permanente riesgo de contraer enfermedades hídricas porque comúnmente viven sin acceso a agua segura y a servicios de saneamiento.

Las poblaciones que se abastecen directamente de aguas de origen superficial (ríos, lagunas, lagos) se encuentran aún en mayor riesgo debido a que la fuente de agua está expuesta a la contaminación de origen orgánico e inorgánico. Las razones para ello incluyen la carencia de una apropiada disposición de excretas y factores como la defecación a campo abierto, las letrinas mal diseñadas y la presencia de animales domésticos y silvestres que actúan como reservorios de agentes patógenos.

Una pequeña parte de la población rural cuenta con servicios de abastecimiento y, en muchos casos, el servicio de agua es discontinuo. Por este motivo, los pobladores suelen almacenar en recipientes el agua potable. La constante manipulación de estos recipientes incrementa las posibilidades de que el agua se vuelva a contaminar y, por consiguiente, que aumente el riesgo de transmisión de enfermedades gastrointestinales.

Los procesos técnicos de tratamiento y desinfección del agua para consumo humano mejoran notablemente la calidad de la misma. Pero en las áreas rurales se presenta una serie de factores que dificultan su ejecución. Estos factores están relacionados con aspectos políticos, económicos, sociales y culturales. Entre ellos están la ubicación geográfica; las dificultades en las vías de comunicación; una limitada inversión en infraestructura sanitaria y programas de desinfección, en personal de operación y mantenimiento de los sistemas de servicios de agua; los problemas de logística; un marco institucional no definido y la falta de líderes en las comunidades.

En las zonas rurales los factores mencionados también dificultan la aplicación eficiente de los programas de vigilancia y control de la calidad de agua de consumo humano. Se requiere, entonces, identificar la forma de efectuar un monitoreo básico de la calidad de agua, lo que permitirá tomar decisiones en forma oportuna y evitar la transmisión de enfermedades por consumo de aguas contaminadas.

2.3 La ciudad de Azogues.

La ciudad de Azogues, fue bautizada con el nombre de “San Francisco de Peleusí de Azogues” por cuanto fue asiento de la comuna de los nativos de Peleusí, los que fueron conquistados por los españoles el 23 de Mayo de 1559, y al encontrar el mercurio o azogue, metal que lo llamaban Cinabrio (sulfuro de Mercurio) en 1562, anexaron el nombre de azogues a la anterior denominación.

El Cantón Azogues, cuyos límites se extienden en aproximadamente 1200 Km², está ubicada geográficamente hacia el norte de la cuenca del río Paute, limita políticamente al norte con la provincia de Chimborazo y Morona Santiago, al Este y Sur con la provincia del Azuay y al Oeste con los cantones Déleg y Biblián. La ciudad de Azogues, capital de la Provincia del Cañar, se halla localizada en la cuenca del río Paute, subcuenca del río

Burgay y la microcuenca del río Tabacay, la misma que abastece de agua dulce a la población azogueña del área urbana y rural.

2.3.1 Infraestructura sanitaria de la ciudad de Azogues.

En lo referente a agua potable, Azogues se encuentra servida mediante las plantas de tratamiento convencionales de Zhindilig, Uchupucún y Mahuarcay, siendo necesario recalcar que las plantas de tratamiento de Uchupucún y Mahuarcay tratan agua cruda para el disfrute de la población mientras que la planta de tratamiento de Zhindilig trata aguas residuales razón por la cual queda fuera del estudio en este trabajo de investigación.

Existe una cobertura del 77,46% con conexión intra-domiciliaria, 17,13% conexión de patio, 1,26% tiene otras fuentes de abastecimiento y 4,15% no dispone del servicio.

A pesar de que Azogues es una ciudad que cuenta con una historia de 454 años, existen serios problemas de abastecimiento de agua, principalmente asociados a la cuenca generadora, por lo que un adecuado manejo de la microcuenca del río Tabacay, repercutirá directamente en una mejor calidad de vida para la población azogueña.

En cuanto al alcantarillado se puede decir que es del tipo combinado y se descarga directamente en los cursos naturales de agua del río Burgay y Tabacay principalmente, aunque también se descarga los residuos domésticos, ganaderos y de la agricultura en las quebradas de la microcuenca del río Tabacay.

Cabe recalcar que de acuerdo al Plan de Manejo Integral de la microcuenca del río Tabacay los sistemas de saneamiento y conservación de las fuentes hídricas dentro de la microcuenca son muy deficientes dando como resultado una degradación progresiva de la misma, ya que los vertidos de aguas residuales son desechados directamente a los cuerpos hídricos más cercanos a las poblaciones, generando un gran problema ambiental conjuntamente con la disposición final de los residuos sólidos.

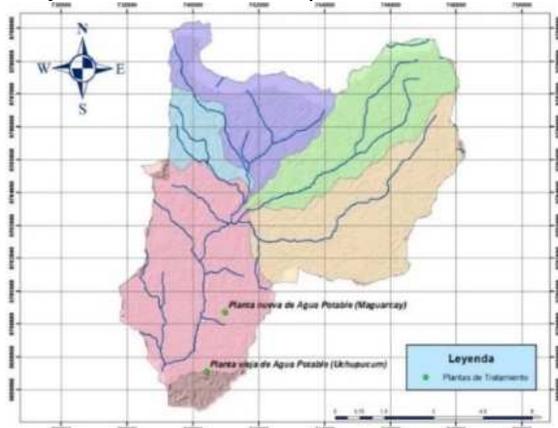


Figura 1. Microcuenca del río Tabacay, plantas de tratamiento de aguas crudas
Fuente: Elaboración propia

2.3.2 Instituciones que laboran en la microcuenca del río Tabacay.

Instituciones encargadas de la protección ambiental dentro del cantón Azogues.

Municipio de Azogues: dentro de su estructura orgánica cuenta con la dirección de gestión ambiental, pero la misma carece de presupuesto, por lo que no se observa una adecuada gestión por parte del Municipio.

Gobierno Provincial del Cañar, Consejo de Gestión de la Cuenca del Paute (CGPaute), y además por ley están inmersos Ministerio del Ambiente, Ministerio de Agricultura, Consejo Nacional de Recursos Hídricos, Centro de Reconversión Económica del Azuay, Cañar y Morona Santiago (CREA).

La Empresa Pública Municipal de Agua Potable, Alcantarillado y saneamiento ambiental del cantón Azogues "EMAPAL", la cual, en enero del 2008 aprobó la creación de la unidad de gestión ambiental, cuyo fin es coadyuvar en la gestión y conservación de los recursos naturales. De hecho, desde el mes de junio del 2007, esta unidad ha trabajado eficientemente, y al momento cuenta con personal asignado exclusivamente al tema ambiental.

La unidad ambiental de "EMAPAL", básicamente tiene como objetivos:

- Concienciar con instituciones, actores y comunidades claves las acciones negativas y positivas, sus efectos e impactos que se dan en la microcuenca.
- Proponer alternativas que anulen, mitiguen o potencien dichos impactos enfatizando en el recurso hídrico

Todas las actividades que se realizan en la microcuenca del río Tabacay, de alguna manera afectan a los recursos naturales, y especialmente al recurso hídrico, tanto en calidad como en cantidad, por lo que es necesario implementar acciones y políticas, que con criterios técnicos, minimicen los efectos negativos y maximicen los positivos. (Médicas, Leonardo, & Cueva, 2008)

2.4 Importancia de la microcuenca del río Tabacay.

La microcuenca del río Tabacay perteneciente a la subcuenca del río Burgay, cuenca del río Paute, se encuentra entre las coordenadas planas UTM 737700 - 748230 Este y 9698000 – 9709300 Norte, posee una superficie de 6650 hectáreas (66.5 Km^2) y una elevación que va desde los 2490 m.s.n.m hasta los 3730 metros sobre el nivel del mar.

La microcuenca del río Tabacay pertenece administrativamente al cantón Azogues ubicada puntualmente en las parroquias de Guapán y Bayas, parroquias bañadas por sus

principales efluentes como son las quebradas Llaucay, Cóndor Yacu, Nudpud, Rosario, Mapayacu y Rubís.

- a) Ubicación de la provincia del Cañar
- b) Ubicación de la microcuenca en la provincia del Cañar
- c) Ubicación de la microcuenca en la cuenca del río Paute

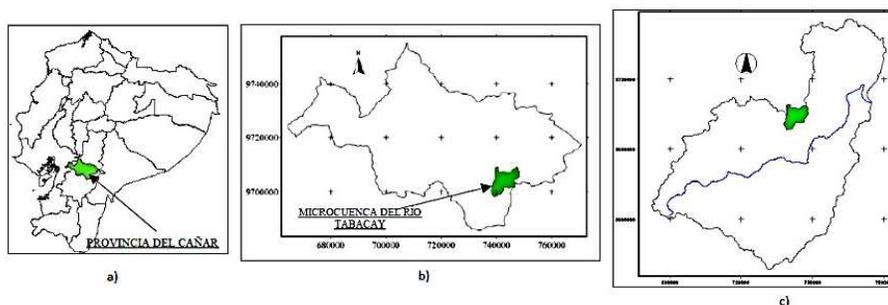


Figura 2. Ubicación geográfica de la microcuenca del río Tabacay
Fuente: (Matovelle, 2015)

El agua del río Tabacay es aprovechada para el abastecimiento de la ciudad de Azogues y parte del sector rural, por esta razón resulta de gran importancia precautelarse la disponibilidad del recurso hídrico en calidad y cantidad para el disfrute de las presentes y futuras generaciones.

El problema se centra en la microcuenca del río Tabacay, perteneciente a la subcuenca del río Burgay, cuenca del río Paute, pues la intensificación de las actividades humanas como la agricultura y la ganadería en zonas no aptas, la introducción de plantaciones extensivas de pino y la tala de árboles han generado una serie de impactos sociales y ambientales, que están incidiendo de forma negativa en el equilibrio biótico y abiótico de la microcuenca, en las condiciones de vida de su población como también en el estado de los recursos naturales que posee, esencialmente el agua dulce. Pues estas actividades antropogénicas han afectado la calidad de agua dentro de la microcuenca lo cual se puede evidenciar en la coloración y eutrofización en las zonas de captación, así mismo una pérdida de cubierta vegetal causada por la tala de árboles y el pastoreo, actividades que han ocasionado que el suelo del páramo pierda su capacidad de regular el flujo hídrico tanto en épocas de estiaje como de invierno provocando inundaciones en las partes bajas de la microcuenca del río Tabacay.

De acuerdo al Plan de Manejo Integral de la microcuenca del río Tabacay, este ecosistema frágil asienta gran biodiversidad en el austro ecuatoriano, encontrando especies de flora y fauna de un importante valor ecológico y que desafortunadamente viven cerca de las zonas afectadas por las actividades antropogénicas. Se puede mencionar especies de aves como: torcazas, quinde café, gorriones, golondrinas, cóndores; especies de mamíferos

como: zorros, osos de anteojos, lobo de páramo, gato de paja, ardillas, venados, ratón marsupial, ciervo enano. La diversidad de especies de flora y fauna que se pueden encontrar dentro de la microcuenca del río Tabacay es solo una razón más para conservar este ecosistema, promoviendo actividades de protección, conservación y gestión de los recursos naturales.

Dentro de la microcuenca del río Tabacay no han existido instrumentos que garanticen una adecuada gestión de este ecosistema frágil, razón por la cual varias instituciones como grupos académicos apiñaron esfuerzos para diseñar un Plan de Manejo Integral de la microcuenca del río Tabacay, proporcionando un documento técnico que con la ayuda del modelo ambiental busque garantizar el manejo adecuado de los recurso naturales que posee el río Tabacay.

Tener la microcuenca en un estado de conservación adecuado es posible con la ayuda de una apropiada herramienta que apoye la planificación de acciones y la toma de decisiones oportunamente, permitiendo la recuperación y mantenimiento ecológico de este ecosistema indispensable para la población azogueña.

2.4.1 Análisis poblacional.

La microcuenca del río Tabacay está conformada por las parroquias de Guapán y Bayas que pertenecen al cantón Azogues, provincia del Cañar. Aproximadamente el 80% de la superficie de la parroquia Guapán forma parte de la microcuenca, mientras que la parroquia Bayas aporta con un 70% de su superficie. (Empresa de Agua Potable Y Alcantarillado de la ciudad de Azogues, 2003)

Dentro de los actores principales que se benefician de los recursos de la microcuenca tenemos a: comunidades campesinas, agricultores, indígenas, ganaderos, instituciones públicas y privadas; todas ellas jugando un rol importante en la conservación de este medio, esencialmente en el recurso agua.

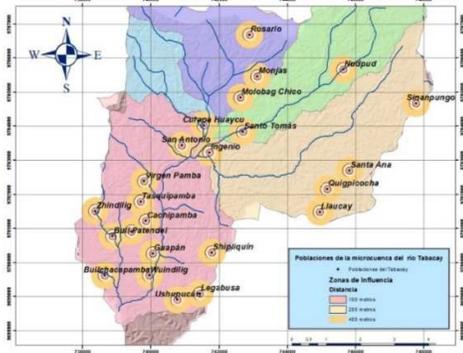


Figura 3. Comunidades que habitan dentro de la microcuenca del río Tabacay (Zonas de Influencia) Fuente: Elaboración propia

“El aumento generalizado de la pobreza de la población latinoamericana, se expresa en el desempleo creciente; en el profundo deterioro de los salarios de los trabajadores; en la emigración forzosa de los habitantes del campo y de la ciudad; en el aumento de la economía informal; en el regreso de enfermedades que ya habían sido erradicadas como el cólera; en la muerte de personas por enfermedades curables como la sarna, las enfermedades gastrointestinales como la tifoidea y la gastroenteritis, las de vías respiratorias como la amigdalitis, las neumonías y la bronconeumonías entre otras, producto de la desnutrición de la población y del deterioro de los servicios sociales básicos, como salud, educación, vivienda, etc. Las familias rurales y urbanas se ve obligadas a vivir hacinadas, a padecer la falta de agua y de drenaje, a compartir baños comunitarios y a vivir bajo techos de lámina o cartón” (Juárez, 2005)

Debido fundamentalmente a la situación económica y al acelerado proceso de migración especialmente a Estados Unidos y España, la provincia del Cañar y particularmente la ciudad de Azogues, se ha visto seriamente afectada, pues este fenómeno ha modificado notoriamente la composición de la familia y de la sociedad, y por tanto el desarrollo de la población.

Efectivamente, al hacer el análisis poblacional del cantón Azogues, se puede observar como existe una discontinuidad en la distribución etérea de la población, probablemente asociado a problemas de migración, conforme se puede observar en la figura 4.

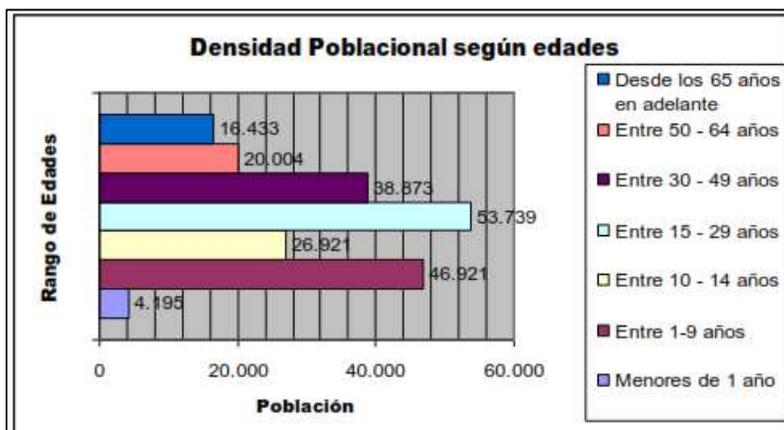


Figura 4. Cuadro estacional de la población del cantón Azogues
Fuente: (Empresa de Agua Potable Y Alcantarillado de la ciudad de Azogues, 2003)

El cantón Azogues cuenta con 9 parroquias, representa el 31.1 % de la población de la provincia del Cañar. El 51.7% viven en el sector rural y el 48.3% vive en el sector urbano, la mayor parte de la población azogueña se dedica a la agricultura aproximadamente un

24.5%, según los datos obtenidos por la Secretaria Nacional de Planificación y Desarrollo “SENPLADES” en el último censo del 2010.

De acuerdo con estos datos obtenidos en el censo del 2010, muestra la importancia de conservar la microcuenca del río Tabacay, pues la mayor parte de la población azogueña se encuentra en el sector rural y por lógica la mayor parte de la población se dedica a la agricultura siendo necesario proponer estrategias de saneamiento y gestión ambiental que procuren la conservación de este ecosistema frente al crecimiento de la población y la deficiencia de sistemas de saneamiento ambiental en el sector rural.

2.4.2 Aspectos Económicos dentro de la microcuenca del río Tabacay.

Las actividades económicas de las personas que viven en la microcuenca del río Tabacay están ligadas a la producción agrícola y pecuaria, la misma que desde épocas pasadas es determinante y fundamental en la vida de sus habitantes.

De acuerdo al Plan de Manejo Integral de la Microcuenca del río Tabacay dentro de las relaciones económicas familiares se tienen que el 57% de la población se dedica a actividades agrícolas, a lo que se debe sumar necesariamente aquellos que tienen por actividad principal solo la actividad pecuaria, que conforma el 16% y la actividad agropecuaria que totaliza el 5%. Por lo tanto, es necesario destacar que las personas se dedican mayoritariamente a actividades agrícolas y pecuarias.

Económicamente y productivamente, también dentro de la microcuenca existe una zona minera de donde se extrae caliza, insumo fundamental para la elaboración de cemento. En la actualidad además de la explotación de caliza se desarrolla la explotación de materiales pétreos siendo la arena el material primario de extracción.

2.4.2.1 Percepción de la problemática ambiental por parte de la población.

Como se ha mencionado ya la excesiva cantidad de las personas que se benefician de una u otra manera de los recursos de la microcuenca provocando que esta llegue a un grado de degradación considerable. El Plan de Manejo Integral de la microcuenca del río Tabacay contiene un componente social muy importante que cuantifica la percepción que tiene la población sobre la contaminación y las causas de estas. De esto se deduce que el 71% de la población tiene la percepción que de que la microcuenca está contaminada, siendo necesario tener presente la ubicación de la gente encuestada ya que en las zonas bajas la contaminación es visible debido a la coloración del agua pero en las partes elevadas es más dificultoso percibir si existe algún tipo de contaminación, pues la dinámica

misma de las quebradas impide observar la contaminación a simple vista siendo necesario realizar análisis de laboratorio para conocer el estado de la microcuenca en la parte alta.

Las causas de la contaminación para los pobladores son claras, se enumeran a continuación según el orden de percepción y prioridad. (Matovelle, 2015)

1. Vertidos directos de aguas residuales por falta de sistemas de alcantarillado
2. Falta de plantas de tratamiento de aguas residuales para zonas donde existe alcantarillado.
3. Contaminación por asentamientos cercanos de ganadería vacuna.
4. Agricultura.
5. Otros tipos de contaminación (fábricas de quesos, acopios de leche, granjas porcinas).

Todas estas acciones generan efluentes que por escorrentía llegan al río, transformándose en un problema de contaminación, según la Norma de Calidad Ambiental, sin embargo, un adecuado proceso de concientización y capacitación que conlleve a un manejo integrado de los recursos naturales que ofrece la microcuenca, con énfasis en el recurso agua, podría eventualmente reducir drásticamente los problemas de contaminación.

2.4.3 Hidrografía.

La zona de cabecera de la microcuenca del río Tabacay garantiza la captación inicial de las aguas y el suministro de las mismas hacia las zonas inferiores durante todo el año. Los procesos en las partes altas de la microcuenca invariablemente tienen repercusiones en la parte baja dado el flujo unidireccional del agua, y por lo tanto es necesario manejar el recurso hídrico de la microcuenca del río Tabacay de manera integral, como una sola unidad. Al interior de la microcuenca, el agua funciona como distribuidor de insumos primarios (nutrientes, materia orgánica, sedimentos) producidos por la actividad sistemática de los recursos. Este proceso modela el relieve e influye en la formación y distribución de los suelos en las laderas, y por ende en la distribución de la vegetación y uso de la tierra.

El movimiento del agua de lluvia y flujos superficiales, a través de la red de drenaje, desde la parte alta de la cuenca hasta la parte baja, promueve el desprendimiento y arrastre de partículas e induce a la formación de los valles, planicies o llanuras de inundación. El sistema hídrico también refleja un comportamiento de acuerdo a como se están manejando el recurso agua, suelo y bosque, así como que actividades antropogénicas o infraestructuras están afectando el funcionamiento ecológico de la microcuenca.

La microcuenca del río Tabacay está conformada por las quebradas de Llaucay, Cónдор Yacu, Nudpud, Rosario, Mapayacu y Rubís fuentes hídricas que abastecen de agua dulce a la ciudad de Azogues tanto del sector rural como urbano. El estudio de modelación ambiental se realizará dentro de las quebradas de Llaucay y Cónдор Yacu por ser fuentes hídricas de mayor abastecimiento de agua cruda y que a su vez son escenarios contrapuestos en lo que se refiere a contaminación de origen antropogénico.

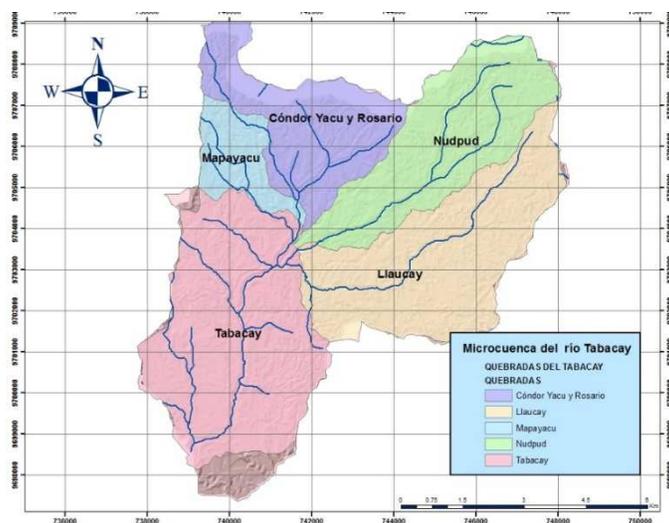


Figura 5. Quebradas que conforman la microcuenca del río Tabacay
Fuente: Elaboración propia

Tabla 1. Área, perímetro y caudal específico de las quebradas que conforman la microcuenca del río Tabacay.

Subcuenca	Area (Ha)	Perímetro (km)	Caudal Específico (l/s/km ²)
Llaucay	1732	23	22,97
Nudpud	1355	20	23,02
Condoryacu	1057	19	23,02
Mapayacu	398	11	23,02
Tabacay	2109	22	23,02
Tabacay Total	6651	43.48	

Fuente: (Cueva, 2008)

La quebrada de Llaucay tiene una longitud de 7.841 kilómetros mientras que la quebrada de Cónдор Yacu posee una longitud de 4.852 kilómetros, cada una desemboca en un punto de captación. El agua captada en estas quebradas es conducida hasta las plantas de tratamiento ubicadas en la parroquia Bayas, desde donde posteriormente es distribuida para el consumo de la ciudad de Azogues. No existen registros de caudales que representen la dinámica real de estos cuerpos hídricos ya que la medición de caudales se realiza en un solo punto de las quebradas de forma mensual dando como resultado datos muy escasos para hacer estudios técnicos hidrológicos que sirvan para gestionar adecuadamente el recurso hídrico. A demás, no se cuentan con estudios técnicos que proporcionen

información sobre los volúmenes de agua captada y el caudal ecológico del lugar, a pesar de que la Empresa de Agua Potable y alcantarillado de la ciudad de Azogues “EMAPAL” se surte de ellas. Por lo que es necesario implementar mecanismos que permitan medir caudales de forma eficiente en diferentes puntos de las quebradas que conforman la microcuenca del río Tabacay.

Dentro de la microcuenca del río Tabacay el recurso agua es indispensable para las actividades diarias de sus pobladores. Sin embargo, y al igual que el resto de los recursos naturales que ofrece la microcuenca, no ha existido una adecuada intervención que consienta promover su sustentabilidad y sostenibilidad, ya que no se cuenta con un sistema de monitoreo técnico que permita conocer el comportamiento real hidrológico y meteorológico en su territorio.

2.4.4 Uso del recurso agua dentro de la microcuenca del río Tabacay.

Para el aprovechamiento del agua la infraestructura es administrada por la Empresa de Agua Potable y Alcantarillado del cantón Azogues “EMAPAL” y consta de captaciones en cuatro de las 6 quebradas que son afluentes, estas son: Llaucay, Nudpud, Cóndor Yacu, Rosario. El agua desde estas captaciones es conducida por tuberías hasta las plantas de tratamiento de Uchupucún y Mahuarca y que se encuentran ubicadas en la parroquia Bayas del cantón Azogues, desde donde es posteriormente distribuida hacia gran parte de la población azogueña.

El Plan de Manejo Integral de la Microcuenca del río Tabacay expone que el 40% de la población que forma parte de la microcuenca poseen en sus domicilios agua entubada, la misma que solo recibe un tratamiento de cloración para su disfrute, proceso que no garantiza una buena calidad de agua.

Por otro lado el 13% de la población utiliza agua proveniente de acequias para necesidades domésticas, el 10% lo hace de ríos y quebradas, mientras que el 8% se abastece de agua proveniente de pozos o vertientes. Estas formas de abastecimiento de agua dulce provocan que la salud de la población del área rural sea vulnerable, sumado a esto los deficientes sistemas de saneamiento con los que cuenta el manejo de este recurso hídrico.

En general, las condiciones de salubridad de los habitantes del área rural de la microcuenca son protervos, puesto que la gran mayoría de la población del Tabacay carece de servicios básicos, especialmente en lo referente al abastecimiento de agua inocua, eliminación de excretas y un sistema eficiente de recolección y tratamiento de residuos sólidos.

La planta de tratamiento de aguas crudas recibe un promedio de 100 l/s desde las captaciones, además existen concesiones de agua en trámite de legalización pero que han sido compiladas ya, esta información se muestra en la tabla 2:

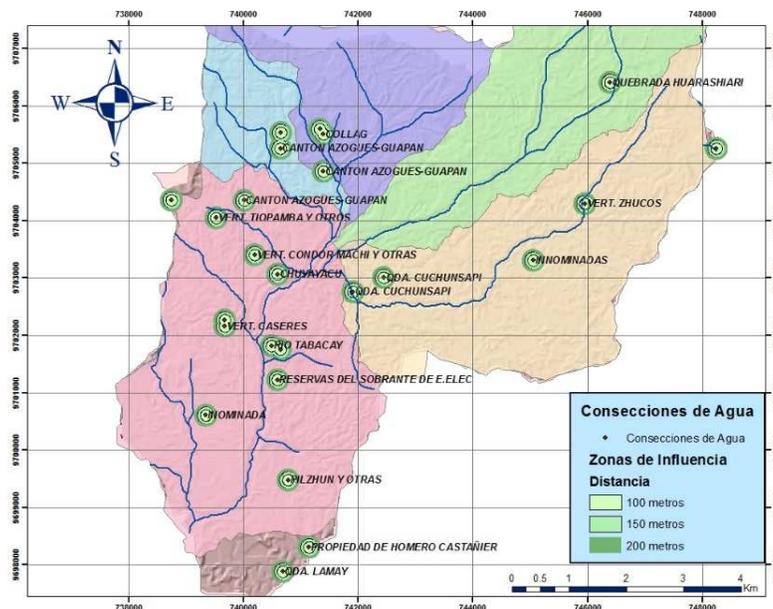


Figura 6. Concesiones de agua pertenecientes a la microcuenca del río Tabacay
Fuente: Elaboración propia

Tabla 2. Usos y caudales de agua de la microcuenca del río Tabacay

Fuente	Uso	Área (ha)	Caudal (L/s)	Concesionario	Cota (msnm)
Tabacay	Industrial		10.00	Industrias Guapán S.A.	2530
Tabacay	Industrial		45.00	Industrias Guapán S.A.	2530
Tabacay	Riego	2.12	0.63	Lucía Yumbla	2670
Tabacay	Riego	4.00	1.60	Horacio Gonzales	2540
Tabacay	Riego	3.62	1.81	Ricardo Guamán y otros	2570
Condoryacu	Riego	60.00	30.00	Cesar Humberto Palacios	3160
Condoryacu	Riego	35.00	6.00	Diego Vintimilla	3200
Condoryacu	Riego	20.00	6.00	Galo Córdova	2980
Total			101.04		

Fuente: (Empresa de Agua Potable Y Alcantarillado de la ciudad de Azogues, 2003)

2.4.5 Contaminación del agua del río Tabacay.

Uno de los impactos negativos que ha degradado de forma agresiva la parte alta de la microcuenca de carácter antrópico es la utilización irresponsable del páramo para actividades agrícolas y pecuarias, así como el avance incontrolable de la frontera agrícola y ganadera que pone en peligro la fragilidad de este ecosistema afectando directamente la regulación hídrica de la microcuenca; no menos importante el arrastre de sedimentos que la

microcuenca aporta al sistema hídrico de la cuenca del río Paute a la cual forma parte, afectando el uso no consuntivo de generación de energía eléctrica.

Las aguas superficiales y subterráneas se contaminan con restos de abonos, productos fitosanitarios de uso agrícola y materia orgánica proveniente de las explotaciones ganaderas. Se caracteriza en general por ser una contaminación difusa, sin unos focos determinados de vertidos que la harían mucho más predecible y con unos tratamientos o acciones preventivas mucho más eficaces. En zonas con agricultura y/o ganadería intensiva aumentan los problemas de nitrificación y se agrava la situación debido al arrastre de los contaminantes por escorrentía superficial y subterránea hacia los cuerpos de agua. La contaminación agrícola contribuye a la eutrofización.

La problemática ambiental generada alrededor del recurso agua, debe analizarse desde la óptica de la diferenciación del sistema natural, para aquello dentro del Plan de Manejo Integral a la microcuenca del río Tabacay se considera tres escenarios distintos, cada uno con un foco distinto de contaminación.

En la zona alta de la microcuenca la problemática responde a la contaminación del agua por el uso inadecuado del suelo en los páramos, ya que estos suelos sirven de agente regulador del ciclo hídrico en los Andes. El uso de estos suelos para agricultura usando técnicas de arado que rompen la estructura del suelo y la introducción de especies exóticas hacen que el suelo pierda la capacidad de almacenar agua y esto provoca una disminución en los caudales, a su vez que el suelo pierde la capacidad de regular el flujo de agua provocando inundaciones en la parte baja de la microcuenca en épocas de invierno y sequía en los suelos en época de estiaje.

En la zona media la mayor parte del recurso es utilizado para el riego de los pastizales que sirven de alimento para el ganado, aquí la contaminación en mayor medida se da por la escorrentía que llega al río arrastrando los excrementos del ganado. También existe una gran carga de sedimentos en la escorrentía debido a la disminución de la capa vegetal para el uso de la ganadería.

La zona baja presenta una densidad poblacional alta, razón por la cual es la mayor consumidora del recurso hídrico. El crecimiento poblacional desorganizado ha dado como resultado que no se posean obras de infraestructura adecuadas para el sistema de saneamiento y que toda la red de alcantarillado descargue sus aguas residuales en el río Tabacay desembocando sus aguas en el río Burgay que cruza la ciudad de Azogues.



Figura 7. Situación actual del río Burgay a su paso por la ciudad de Azogues
Fuente: Ilustración propia



Figura 8. Situación actual de los canales de evacuación del área urbana
Fuente: Ilustración propia



Figura 9. Vertidos directos de aguas residuales al río Burgay
Fuente: Ilustración propia

Al analizar la microcuenca del río Tabacay como un solo sistema natural, es indispensable tener en cuenta sus interacciones físico-biológicas y socio-ambientales relacionadas al agua y su relación con otros recursos naturales, a fin de tomar las acciones necesarias para la reducción de la vulnerabilidad, riesgo a desastres principalmente asociadas a riesgos hidro-climáticos (inundaciones, deslizamientos, avalanchas, sequías, etc.) y prácticas degradantes de los recursos naturales.

En efecto, bajo condiciones de lluvias que superan la capacidad de infiltración de los suelos, o de prácticas silvo-agropecuarias, industriales, actividades antropogénicas (deforestación, sobrepastoreo, quema, agricultura intensiva sin prácticas de manejo y conservación de suelos y aguas, vertidos directos de contaminantes a las aguas superficiales, apertura de vías de comunicación, construcción de viviendas en zonas vulnerables, etc.), se puede producir erosión, deslizamientos, asolvamientos de cauces, disminución de la capacidad hidráulica de los drenajes naturales, caudales pico que causan desbordamiento de los ríos e inundaciones con posibles pérdidas de vidas humanas, daños a la infraestructura social y productiva, deterioro de la calidad de agua, sequías en la parte baja y hasta podría ocurrir severas afectaciones al ciclo hidrológico. Todos estos efectos podrían ocurrir al no implementar un sistema eficiente de protección y conservación de la microcuenca del río Tabacay.

Un sistema de protección y conservación que necesariamente debe de incluir políticas, normas, ordenamiento territorial, buena gobernanza, manejo de recursos naturales, educación, organización, prevención y mecanismos de financiamiento, características que son la base para un manejo correcto de la microcuenca, cuyo objetivo es reducir su vulnerabilidad, el riesgo al desastre y controlar las actividades antropogénicas que degraden la microcuenca.

2.4.6 Marco Legal.

Un avance importante en la conservación de la microcuenca ha sido establecer un componente legal, que proteja este ecosistema de las actividades antropogénicas que poco a poco han cambiado la dinámica ecológica de la microcuenca del río Tabacay. Ya que en los países en vías de desarrollo es necesario tener bases legales para poder actuar ante los problemas de contaminación.

Este componente promueve el sustento legal para la operatividad de la aplicación o implementación del Plan de Manejo de la microcuenca del río Tabacay. De este componente está encargado el Gobierno Autónomo Descentralizado de la ciudad de Azogues y el Acompañamiento Organizacional al Desarrollo (ACORDES) de la Universidad Estatal de Cuenca, que son responsables del componente socio organizativo del proyecto.

Este componente garantiza su aplicabilidad a razón de las siguientes leyes referentes a la protección de las fuentes hídricas dentro del Ecuador.

- Constitución política de la república
- Ley de régimen municipal
- Ley de régimen provincial

- Ley de gestión ambiental
- Ley de aguas
- Ley forestal y de conservación de áreas naturales y vida silvestre
- Ley de minería
- Reglamento ambiental de actividades mineras
- Ley del sistema nacional de ciencia y tecnología
- Código de la salud
- Ley de prevención y control de la contaminación ambiental

Tener el amparo de estas leyes encargadas de la protección de los recursos hídricos en nuestro país y poder crear un precedente legal propio para la protección de esta microcuenca resulta indispensable para poder actuar generando medidas de remediación y conservación.

En la microcuenca del río Tabacay, con las bases legales conformadas, han logrado crearse Acuerdos Recíprocos por el Agua (ARA) con la participación de los usuarios del servicio del agua que contribuyen con aportes económicos cobrados en las planillas para formar un fondo local de conservación. Estos recursos han sido usados para dar incentivos y compensaciones a los usuarios de las partes altas de la cuenca hidrográfica como: asistencia técnica, equipamiento, insumos, exención de impuestos y apoyos para comenzar actividades alternativas que no generen un impacto en los suelos de la microcuenca. (Empresa de Agua Potable Y Alcantarillado de la ciudad de Azogues, 2003)

Gracias a estos incentivos los señores dueños de las propiedades que se encuentran en la parte alta de la microcuenca se comprometieron a proteger y conservar los bosque y páramos, además de recuperar las zonas que han sido severamente dañadas por la mano del hombre a la vez que se ofrecieron a realizar prácticas productivas amigables con el ambiente, dando como resultado que las personas que se encuentran en las partes bajas de la microcuenca tengan una mejor calidad de agua y porque no decir una mejor forma de vida. De esta manera se puede alcanzar una protección óptima de la microcuenca siempre y cuando se unan esfuerzos tanto la población, entidades públicas y privadas y esencialmente la comunidad académica responsable de la protección de nuestros recursos naturales.

2.5 Contaminantes que intervienen en la modelación de la calidad de agua.

Los parámetros a modelar en las quebradas Llaucay y Cóndor Yacu son sólidos suspendidos, demanda biológica de oxígeno, nitrógeno orgánico, nitrógeno amoniacal, nitratos y oxígeno disuelto. La temperatura y el potencial de hidrógeno se utilizaron simplemente para darle robustez al modelo matemático y tener una idea de las reacciones

que se pudieran suscitar entre los contaminantes con la influencia de estas variables de calidad.

Los contaminantes no conservativos son aquellos que sufren una transformación en el medio en el que se encuentran. En este punto se indica solamente los contaminantes en estudio para la modelación, entender lo que ocurre a este tipo de contaminantes permite determinar el término fuente/sumidero para cada sustancia.

2.5.1 Sólidos Suspendidos.

La materia suspendida está compuesta por limos, arcillas y finas partículas de materia orgánica e inorgánica, plancton y otros organismos microscópicos. Su contenido puede variar estacionalmente por variaciones en la actividad biológica y en eventos de lluvias fuertes por el incremento de sólidos suspendidos en la escorrentía. Los sólidos suspendidos afectan tanto a la transparencia como a la turbidez de las aguas y por ello la vida acuática.

La cantidad de sólidos en el agua está relacionado directamente con la calidad de la misma, pudiendo variar de acuerdo a la procedencia y al destino. La determinación de sólidos como indicador de calidad de agua es generalmente empleada en establecer la calidad para consumo humano así también la turbidez en el agua es generada por la presencia de sólidos suspendidos que afectan la vida acuática.

Las diferentes formas de sólidos propuestos indican la presencia de sales disueltas, partículas en suspensión de carácter orgánico o inorgánico. Los sólidos suspendidos se determinan restando los sólidos disueltos de los sólidos totales. Los sólidos suspendidos son, tal vez, el tipo de sólidos más importantes en determinar en los estudios de calidad de agua en nuestro medio, principalmente porque se utilizan para el diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales.

2.5.2 Materia Orgánica.

Las aguas naturales, además de sustancias minerales y disueltas, pueden llevar en suspensión sustancias orgánicas provenientes del lavado de los suelos o del metabolismo de los organismos que viven en ellos. Además, los cuerpos de aguas superficiales pueden recibir descargas de aguas residuales de origen doméstico e industrial, las cuales provocan la polución y la contaminación en niveles variables.

Estas sustancias orgánicas representan una fuente de alimentación para los organismos autótrofos y heterótrofos presentes en el agua. Tienden a desaparecer progresivamente por oxidación, y pasar a CO₂, amoníaco, nitritos, nitratos, etc.

Por lo general las aguas naturales no contaminadas presentan cantidades mínimas de materia orgánica, salvo aquellas que provienen de bosques o aguas estancadas.

La materia orgánica puede ser en muchos casos la responsable del color, olor y sabor del agua, características que necesariamente deben ser eliminadas durante los procesos de tratamiento de aguas crudas a fin de hacerla apta para el consumo humano.

Métodos para determinar la concentración de materia orgánica biodegradable y no biodegradable.

a) DBO₅

El parámetro más ampliamente utilizado para determinar el contenido de materia orgánica de una muestra de agua es la demanda bioquímica de oxígeno. La DBO se mide determinando la cantidad de oxígeno que requieren los microorganismos (bacterias principalmente) para degradar, oxidar, estabilizar, etc., la materia orgánica.

b) DQO

La DQO es una prueba ampliamente utilizada para determinar el contenido de materia orgánica en una muestra de agua. La DQO equivale a la cantidad de oxígeno consumido por los cuerpos reductores presentes en un agua sin la intervención de los organismos vivos.

Los valores de la DQO son mayores que los de la DBO y la diferencia aumenta con la presencia de sustancias tóxicas que hagan la muestra de agua biológicamente resistente a la degradación.

Sólo en el caso de desechos que se estudien cuidadosamente es posible obtener una relación entre DQO y DBO. Al conocer la relación entre DQO y DBO es posible determinar la cantidad de materia orgánica biológicamente degradable y a su vez el tipo de tratamiento que se deba dar a esa agua.

2.5.3 Oxígeno disuelto.

Su presencia es esencial en el agua; proviene principalmente del aire. Niveles bajos o ausencia de oxígeno en el agua. Pueden indicar contaminación elevada condiciones sépticas de materia orgánica o una actividad bacteriana intensa; por ello la cantidad de oxígeno disuelto en el agua se puede considerar como un indicador de contaminación.

Es una de las condiciones más importantes para que exista crecimiento y reproducción de una población normal de peces y otros organismos acuáticos.

El oxígeno que existe en un sistema natural acuático es un claro indicador de las condiciones en las que se encuentra. Algunos conceptos se deben tener claro para entender el comportamiento de esta sustancia en el medio. (Matovelle, 2015)

- Concentración de saturación de oxígeno: es la máxima concentración de oxígeno que puede tener el agua para una temperatura, presión atmosférica y salinidad determinadas.
- Demanda biológica de oxígeno (DBO_{lim}): es la cantidad de oxígeno consumido por los microorganismos para degradar una cantidad de materia orgánica.
- La velocidad de degradación de la materia orgánica está limitada por la presencia de oxígeno disuelto. (Modelizamos esta limitación por medio de un término Monod)

La presencia de oxígeno disuelto en el agua cruda depende de la temperatura, la presión y la mineralización del agua. La Ley de Henry y Dalton dice: “La solubilidad de un gas en un líquido es directamente proporcional a la presión parcial e inversamente proporcional a la temperatura”. El agua destilada es capaz de disolver más oxígeno que el agua cruda.

Para diferentes valores de temperatura se puede tener diferentes valores de concentración de oxígeno de saturación, en la tabla 3 se muestra la concentración de oxígeno disuelto equivalente a un grado de saturación del 100%, para la temperatura anotada a la presión barométrica normal, solo para agua dulce.

Tabla 3. Variación de la concentración de oxígeno en relación a la temperatura

Temperatura (°C)	OD (mg/l)	Temperatura (°C)	OD (mg/l)
0	14.6	15	10.1
1	14.2	16	9.9
2	13.8	17	9.7
3	13.5	18	9.6
4	13.1	19	9.3
5	12.8	20	9.1
6	12.5	21	8.9
7	12.1	22	8.7
8	11.8	23	8.6
9	11.6	24	8.4
10	11.3	25	8.3
11	11.0	26	8.1
12	10.8	27	8.0
13	10.5	28	7.8
14	10.3	29	7.7

Fuente: Canadá State Water Resources, 2000

Analizando la tabla tres se puede decir que la concentración de oxígeno en el agua en estado natural varía de forma inversamente proporcional a la temperatura del medio. Al analizar los datos observados de oxígeno disuelto y temperatura de las quebradas Llaucay y Cóndor Yacu comparando con la tabla uno, se puede decir que para la quebrada Llaucay los valores de la temperatura varían entre 11 y 13 °C y los valores de oxígeno disuelto varían entre los 7 a 10 mgO₂/l lo que da como resultado un grado de concordancia con los valores de la tabla, cuyos resultados de oxígeno disuelto para esa temperatura están entre los 10.5 a 11 mgO₂/l. En cuanto a la quebrada Cóndor Yacu los valores de la temperatura varían entre los 9 y 10 °C y sus valores de oxígeno disuelto se encuentran entre los 6 y 8 mgO₂/l, al comparar con los valores de oxígeno disuelto que se encuentran entre los 11.3 a 11.6 mgO₂/l en la tabla uno, se observa que existe un gran margen de diferencia entre estos datos. Este margen de diferencia entre los valores observados y los valores que indica la tabla uno puede deberse a que la presión atmosférica también influye directamente sobre las concentraciones de oxígeno disuelto como se explica a continuación.

La presión atmosférica también es un factor muy importante que influye en la concentración de oxígeno disuelto, la disminución de la concentración de saturación referente a la altitud es debida a la disminución de la presión atmosférica; es decir, son dos factores inversamente proporcionales. Se considera que la presión atmosférica desciende 1% por cada 82 metros de ascenso, con esto se tiene la siguiente expresión:

$$[O_2]_{sat, z} = [O_2]_{sat, 0} e^{\frac{-z}{8200}} \quad (1)$$

Ecuación 1. Descenso de la presión atmosférica

Fuente: Zison, 1978

En donde **z** viene expresada en metros

Un sistema natural es muy dinámico y complejo a la vez, en el pueden ocurrir distintas interacciones entre los factores que le componen, estos factores pueden ocasionar un aumento o una disminución en la concentración de oxígeno disuelto. En la figura 10 se presenta un esquema con las principales fuentes y consumos del oxígeno.

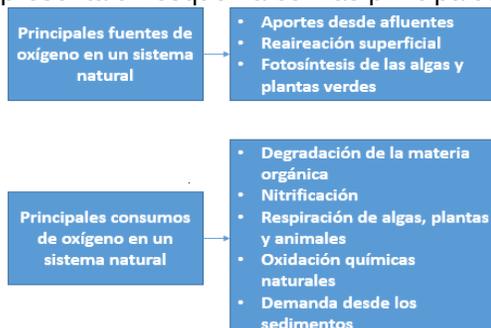


Figura 10. Principales fuentes y consumos de oxígeno en un sistema natural

Fuente: (Matovelle, 2015)

Las aguas superficiales no contaminadas, que poseen una alta dinámica hídrica, suelen estar saturadas de oxígeno y a veces incluso sobresaturadas; su contenido depende de la aireación, de las plantas verdes presentes en el agua, de la temperatura y la hora del día, etc.

De la observación de los datos de oxígeno disuelto en algunos ríos, se deduce que en la mayoría de ellos se produce contaminaciones esporádicas que no afectan la concentración del oxígeno disuelto, presentándose solamente como fenómenos locales que son corregidos oportunamente gracias a las características hidrológicas y topográficas que presentan ciertos cuerpos de agua. Por otra parte, durante el verano el caudal de un río disminuye notablemente sumado a esto el consumo de los seres acuáticos aumenta por unidad de volumen afectando la cantidad de oxígeno disponible. Por eso no es nada extraño que haya grandes diferencias entre el verano y el invierno en lo que se refiere a concentración de oxígeno disuelto.

Igualmente ocurre que el contenido de oxígeno disuelto varía del día a la noche, ya que los seres vivientes consumen oxígeno para la respiración las 24 horas del día. Sin embargo, la fotosíntesis solo se realiza con la presencia de la luz solar.

Se ha demostrado la existencia de una estrecha relación entre la distribución de oxígeno y la productividad de materia orgánica, viva o muerta. Por otro lado, la cantidad de oxígeno disuelto en un cuerpo de agua está relacionado con su capacidad de autodepuración.

2.5.4 Nitrógeno Total.

El nitrógeno junto con el fósforo son los nutrientes esenciales para el desarrollo de la vida y están presentes en toda la materia vegetal, existe una gran disponibilidad en el medio ambiente ya que alrededor del 80% de la atmósfera está formado de nitrógeno gas (N_2) procedente mayoritariamente de la desnitrificación de los nitratos. El nitrógeno posee un ciclo que permite que se transforme en especies asimilables para los seres vivos como amonio (NH_4) procedente de la mineralización del nitrógeno orgánico y nitratos (NO_3) procedente de la nitrificación del nitrógeno amoniacal. En los medios acuáticos se puede encontrar nitrógeno orgánico (NO) en forma disuelta o particulada que proviene de la muerte de la materia orgánica para luego mineralizarse a amonio y su posterior nitrificación y desnitrificación cumpliendo así de esta manera el ciclo completo del nitrógeno.

El nitrógeno es un nutriente presente en la materia vegetal, de gran importancia para el desarrollo de diversas formas de vida en los sistemas acuáticos y su presencia en exceso en los cuerpos de agua provoca contaminación debido al consumo de oxígeno en el paso de

amonio a nitratos y si el pH del agua es elevado puede presentarse amonio no ionizado que es tóxico. (Matovelle, 2015)

➤ **Nitrógeno Amoniacal**

El amonio es el producto final de la reducción de sustancias orgánicas e inorgánicas nitrogenadas y debe su origen a los siguientes factores:

- El nitrógeno atmosférico por fijación química.
- Las proteínas animales o vegetales, por putrefacción mediante acción microbiana.
- La reducción de nitritos.

El amonio en el agua natural procede del arrastre de la escorrentía de nitrógeno orgánico e inorgánico, excreciones de la biota, de la reducción de nitrógeno gas por microorganismos y del intercambio de gas con la atmósfera. Las fuentes no naturales que aportan amonio al sistema acuático son los vertidos urbanos e industriales. El amonio puede presentarse como NH_4 en los sistemas naturales o en su forma no ionizada NH_3 la misma que es tóxica para los organismos acuáticos. El equilibrio entre estas dos formas de amonio viene marcado por la variable de temperatura, pH, salinidad, la concentración de oxígeno disuelto, dióxido de carbono y compuestos tóxicos siendo la temperatura y el pH los dos parámetros más influyentes para que en el sistema hídrico pudiese existir amonio tóxico. La toxicidad del NH_3 tiene mayor impacto sobre las comunidades de peces, pues los organismos invertebrados y las plantas presentan un mayor grado de tolerancia.

Los ambientes acuáticos sin contaminar contienen pequeñas cantidades de nitrógeno amoniacal, generalmente menores de 0.1 mg/l . Las concentraciones de nitrógeno amoniacal medidas en aguas superficiales son típicamente menores de 0.2 mg/l pero pueden alcanzar hasta $2 - 3 \text{ mg/l}$. Concentraciones más altas pueden indicar que existe contaminación de origen orgánico procedente de vertimientos de aguas residuales domésticas, industriales o generada por la escorrentía que arrastra los fertilizantes de los sembríos que se encuentran junto a las fuentes de agua. El nitrógeno amoniacal, es por lo tanto, un indicador de contaminación orgánica.

Si un cuerpo hídrico recibe descargas de aguas residuales domésticas, el nitrógeno estará presente como nitrógeno orgánico amoniacal, el cual, en contacto con el oxígeno disuelto, se irá transformando por oxidación en nitrito y nitrato. Este proceso de nitrificación depende de la temperatura, del contenido de oxígeno disuelto y del pH del agua.

➤ Nitritos

La presencia de nitritos en un sistema natural es un excelente indicador de la contaminación urbana reciente que sufrió, debido a la reacción violenta que se da por oxidación el paso de nitritos a nitratos.

El nitrógeno de nitritos, cuya determinación se realiza calorimétricamente, es relativamente inestable y fácilmente oxidable a nitratos. La concentración de nitritos raramente excede la cantidad de 1 mg/l en las aguas residuales y de 0.1 mg/l en el caso de las aguas superficiales y subterráneas. A pesar de que sus concentraciones suelen presentarse en concentraciones pequeñas, el análisis de los nitritos tiene gran importancia en los estudios de aguas, debido a su gran toxicidad para gran parte de la fauna piscícola y demás especies acuáticas.

➤ Nitratos

El nitrato es la forma más oxidada del nitrógeno que se puede encontrar en el agua. Se forma en la descomposición de las sustancias orgánicas nitrogenadas, principalmente proteínas. Es importante considerar que cuando existen actividades antrópicas, las aguas superficiales pueden tener concentraciones hasta de 5 mg/l pero normalmente menores a 1 mg/l . Concentraciones por encima de los 5 mg/l usualmente indican contaminación, ya sea por desechos domésticos, de animales o la escorrentía. Para el suministro Humano la Organización Mundial de la Salud "OMS" recomienda que las concentraciones de nitratos deben ser inferiores a 50 mg/l y por su parte la legislación ecuatoriana en el Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente "TULSMA" libro VI -anexo 1- "Límites máximos permisibles para aguas de consumo humano y uso doméstico, que únicamente requieren tratamiento convencional", el límite máximo permisible es de 10 mg/l .

Concentraciones altas de nitratos presentes en las aguas crudas puede causar metahemoglobina (color azul de la piel) en los infantes alimentados con leche preparada con agua contaminada. La enfermedad es producida por la reducción de los nitratos a nitritos dentro del sistema digestivo de los niños que beben esta leche contaminada, pues como se mencionó anteriormente los sistemas hídricos a modelar abastecen de agua dulce a la ciudad de Azogues y concretamente a las partes altas de las quebradas Llaucay y Cóndor Yacu, donde en su mayoría la población se dedica a actividades ganaderas.

Los procesos principales en la cinética del nitrógeno son:

- **Amonificación:** es la mineralización del nitrógeno orgánico disuelto pasando a nitrógeno amoniacal.

- **Nitrificación:** es la oxidación de amonio a nitritos y de nitritos a nitratos. El proceso de transformación de nitritos a nitratos es mucho más rápido que el de amonio a nitratos, razón por la cual se suele considerar el paso directo de amonio a nitratos al momento de modelar estas variables de calidad.
- **Desnitrificación:** es la reducción de los nitratos a nitrógeno gas (N_2), este proceso se da en condiciones anóxicas por lo que puede ser un mecanismo de eliminación del nitrógeno importante.
- **Consumo por el fitoplancton:** el amonio y los nitratos son consumidos y acumulados en forma orgánica por el fitoplancton, por lo general el fitoplancton tiene preferencia por el amonio, esto se puede representar con un factor de preferencia al momento de modelar.

En el caso de la modelación ambiental se considera directamente el paso del Nitrógeno Orgánico disuelto a amonio (NH_4^+) proceso conocido como mineralización, y el paso directo de amonio a nitratos (NO_3^-) proceso conocido como nitrificación, el paso de amonio a nitrito no es considerado por ser una reacción muy violenta.

2.5.5 Temperatura.

La temperatura es tal vez el parámetro físico más importante del agua. A demás de afectar la viscosidad y la velocidad de las reacciones químicas, interviene en el diseño de la mayoría de los procesos de tratamiento del agua, además influye directamente en el retardo o aceleración de la actividad biológica, la absorción de oxígeno, la precipitación de compuestos, la formación de depósitos, la desinfección y los procesos de mezcla, floculación, sedimentación y filtración.

Los sistemas de tratamiento de aguas residuales incluyen procesos químicos y biológicos que dependen de la temperatura, así como los fenómenos presentes en la auto-purificación de cuerpo receptores, la vida acuática y la adecuación del agua para fines benéficos.

- La temperatura afecta directamente las reacciones químicas y las velocidades de reacción.
- La temperatura óptima para el desarrollo de la actividad bacteriana está en el rango de 25 a 35°C.
- Los procesos de digestión aerobia y nitrificación se detienen en el orden de 50°C.
- Alrededor de los 15°C, las bacterias productoras de metano cesan su actividad, y, alrededor de los 5°C, las bacterias autotróficas nitrificantes dejan de actuar
- A los 2°C, las bacterias quimioheterotróficas que actúan sobre la materia orgánica carbonácea alcanzan la inactivación.

- A mayor temperatura mayor salinidad.
- La temperatura influye directamente en la concentración de oxígeno disuelto, es decir, que la concentración de oxígeno en el agua dulce varía de forma inversamente proporcional a la temperatura del medio.

Las variaciones de este parámetro en las corrientes de agua generan un cambio en el ambiente de desarrollo de la fauna y la flora presente en él; elevan el potencial tóxico de ciertas sustancias disueltas en el agua y originan la disminución del oxígeno disuelto, lo que conduce a condiciones anaeróbicas de la corriente.

Al llevar a cabo la modelación en sistemas naturales es necesario realizar la Ecuación de Corrección de Temperatura, pues este parámetro afecta la velocidad de la mayor parte de reacciones que ocurren dentro de los sistemas acuáticos.

$$K(T) = K(20^\circ)\theta^{(T-20)} \tag{2}$$

Ecuación 2. Corrección por temperatura
Fuente: (Svante Arrhenius, 1889)

Donde:

K: constantes de degradación

T: Temperatura Ambiente

T1: Temperatura de referencia a 20°C

θ : Cinética de reacción.

Se suele utilizar como temperatura de referencia 20°C (laboratorio)

Tabla 4. Cinéticas de reacción de la Temperatura

Teta (θ)	Reacción
1.024	Reacción superficial (oxígeno)
1.047	Degradación de la Materia Orgánica
1.066	Crecimiento de Fitoplancton
1.08	Demanda de oxígeno desde los sedimento

Fuente: (Svante Arrhenius, 1889)

2.5.6 Potencial de Hidrógeno.

Es uno de los parámetros más importantes de calidad para controlar la operación de las estaciones de tratamiento. Generalmente se mide en forma instrumental empleando un pH

metro, o empleando soluciones y papeles indicadores que cambian de color a diferentes valores de pH.

El rango de pH para la vida biológica es muy estrecho y crítico. El intervalo adecuado para la existencia de la vida biológica está entre 5 y 9. Las aguas residuales con valores de pH menores a 5 y superiores a 9, son de difícil tratamiento mediante procesos biológicos. Si el pH del agua residual tratado no es ajustado antes de ser vertido, el pH de la fuente receptora puede ser alterado.

Origina cambios en la fauna y la flora de los cuerpos de agua. Ejerce influencia sobre la toxicidad de ciertos compuestos, como el amoníaco, metales pesados, hidrógeno sulfurado, etc.

Es importante decir que el pH mide el grado de acidez o de alcalinidad pero no determina el valor exacto de la acidez ni de la alcalinidad.

De acuerdo a muestras de agua tomadas in-situ se puede decir que el pH en las quebradas Llaucay y Cóndor Yacu es inferior a 8.5, lo que nos da entender que son aguas acidas las mismas que se encuentra en un rango aceptable para fuentes naturales de agua.

La acidez en las aguas naturales es ocasionada por la presencia de CO₂ o la presencia de un ácido fuerte como podría ser el ácido sulfúrico o el ácido clorhídrico. La acidez ocasionada por el CO₂ no tiene efectos conocidos sobre la salud es más la soda mineral tiene altas concentraciones de CO₂ y no se les conoce ningún efecto adverso sobre la salud. En cuanto a la acidez mineral generada por las actividades antropogénicas presenta efectos altamente perjudiciales para la salud, cabe recalcar que cualquier agua que sea acida, sin importar el tipo, son altamente corrosivas.

Se considera que el pH de las aguas tanto crudas como tratadas debería estar entre 5.0 y 9.0. Por lo general, este rango permite controlar sus efectos en el comportamiento de otros constituyentes del agua.

Después de haber realizado un análisis sobre la importancia que tienen estas variables de calidad de agua a modelar, se puede decir que los resultados de los análisis de laboratorio tomados en diferentes puntos de las quebradas junto con los datos obtenidos de la estación de calidad de la EMAPAL, darán una idea del estado en el que se encuentra estas fuentes de agua, proporcionando información base que contribuya al momento de realizar simulaciones de escenarios futuros que representen la realidad hidrológica de las quebradas de Llaucay y Cóndor Yacu.

2.6 Modelos de Calidad de Agua como herramientas en la toma de decisiones.

Dada la complejidad de los sistemas acuáticos, en la práctica el ingeniero ambiental ha tratado de representar las distintas reacciones que ocurren en estos ecosistemas por medio de los modelos matemáticos y así disponer de herramientas para la toma de decisiones.

Los modelos utilizados son representaciones formales de la realidad que permiten analizar, comprender y estudiar un determinado fenómeno. Los modelos pueden tener varias formas como la simple descripción verbal, la conceptualización y el desarrollo matemático, siendo estos modelos utilizados para evaluar distintas alternativas de gestión para mejorar la calidad de agua.

Los modelos de calidad de agua son relaciones matemáticas que permiten entender y cuantificar las relaciones causa-efecto de los procesos físicos, químicos y biológicos que tienen lugar dentro de un cuerpo de agua. Más importante aún los modelos contribuyen en la toma de decisiones para mejorar la calidad de agua del cuerpo hídrico en análisis. En fin el objetivo primario de los modelos de calidad de agua es que una vez desarrollados y calibrados permitan predecir la concentración de los contaminantes para poder aplicar distintas alternativas de tratamiento.

No existe un modelo ideal, ya que este dependerá de la aplicación al sistema natural que se quiera analizar, es decir, que todo modelo tiene simplificaciones con respecto a la realidad a representar (o sea que hay aspectos de la realidad que no van hacer reproducidos satisfactoriamente) (Buruas, 2001), y que un modelo será adecuado siempre que pueda quedarse con la parte medular o fundamental del aspecto a estudiar del sistema, siendo el modelo óptimo aquel capaz de reproducir y predecir las variables deseadas con el mínimo número de parámetros y tiempo de cálculo posibles. A la vez que permita simular escenarios a futuro para poder aplicar medidas oportunas de tratamiento de aguas que abaraten costos a futuro.

2.6.1 Balance de materia para la modelación de la calidad.

Para demostrar la objetividad y funcionamiento del modelo matemático a desarrollar, este debe establecer la concentración de cualquier contaminante en cualquier momento y punto del espacio, debe tener en cuenta los factores que determinan la evolución de cualquier sustancia en el medio natural como es su reactividad (procesos físicos químicos y biológicos) y la velocidad de su transporte físico en el medio. (Chapra, 2008)

Teniendo en cuenta todos los aspectos de la zona de estudio se puede determinar el modelo matemático que se debe emplear para determinar la calidad de agua, esto se logra con la ecuación de balances de materia en los sistemas naturales.

El núcleo de cualquier modelo de calidad de agua son los balances de materia. Los balances se aplican a cada uno de los contaminantes que se van a analizar, los mismos que pueden ser contaminantes químicos, físico y biológicos según el tipo problema de estudio. Dichos contaminantes constituyen los componentes del modelo.

En un sistema completamente mezclado ha de cumplirse el balance de materia que no es más que un conteo de las entradas, salidas, reacciones y acumulación de materia en un volumen de control, de ahí se cumple la ecuación fundamental de conservación de la materia. (Matovelle, 2015)

$$\text{Acumulación} = \text{Entradas} - \text{Salidas} + \text{Fuente o Sumidero}$$



Figura 11. Esquema balance de materia
Fuente: (Paredes, 2004)

La ecuación general de balance de la materia representa la variación de la concentración del contaminante el cabo de un tiempo en un volumen de control.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x}(u_x C) - \frac{\partial}{\partial y}(u_y C) - \frac{\partial}{\partial z}(u_z C) + \frac{\partial}{\partial x}\left(E_x \frac{\partial C}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(E_y \frac{\partial C}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(E_z \frac{\partial C}{\partial z}\right) + S_k \quad (3)$$

Ecuación 3. Balance de materia
Fuente: (Chapra, 2008)

Donde:

C: concentración del contaminante (mg/l).

t: tiempo (sg).

U_x, U_y, U_z: componentes del vector real del agua; velocidad longitudinal, transversal y vertical (m/s).

Ex, Ey, Ez: coeficiente de dispersión longitudinal, transversal y vertical (m^2/sg)

Sk: fuente o sumidero del contaminante, por unidad de volumen del flujo y de tiempo ($mg/l.s$).

Los términos de la ecuación describen lo siguiente:

Acumulación. Primer término de la ecuación de balance de masas, representa la variación de la materia presente en el sistema con relación al tiempo.

Transporte por convección. Son los términos de velocidad del segundo miembro de la ecuación de balance de masas, representa el movimiento del contaminante en conjunto con el fluido e indica la diferencia entre las entradas y salidas del contaminante en el volumen estudiado.

Transporte por dispersión. Es el tercer miembro de la ecuación de balance de masas, hace referencia a los procesos de transporte a las que están sujetas las sustancias disueltas y/o particuladas y que no están relacionadas directamente con el transporte convectivo.

Termino de fuente/sumidero. Es el cuarto miembro de la ecuación de balance de masas, este representa todas las posibles entradas y salidas del contaminante en estudio que puedan producirse en determinada unidad de tiempo y de volumen de fluido (Chapra, 2008), (Monerris & Doménech, 2002).

2.6.2 Simplificaciones para sistemas naturales.

La mejor manera de representar un sistema es modelando en sus tres dimensiones (largo, ancho y profundidad), pero resulta muy complejo y costoso obtener la información necesaria para nutrir estos tipos de estudios, además de la alta capacidad computacional que estos estudios demandarían; razón por la cual se debe decidir si todo el esfuerzo que se necesita para obtener un modelo tridimensional compensa los resultados que se pretende obtener desde el punto de vista de calidad de agua.

Se pueden realizar simplificaciones a los modelos matemáticos sin necesariamente afectar a los resultados que se obtienen en él análisis, generalmente para ríos se pueden considerar sistemas unidimensionales o bidimensionales dependiendo de las características del mismo. Para el caso de las quebradas de Llaucay y Cóndor Yacu se consideraran sistemas unidimensionales debido a su poca profundidad y anchura, de esta consideración se puede obtener una simplificación, como muestra la ecuación 4.

$$\frac{dC}{dt} = -\frac{d}{dx}(UxC) + \frac{d}{dx}\left(Ex\frac{dc}{dx}\right) \pm Sk \quad (4)$$

Ecuación 4. Modelo simplificado de la ecuación general de conservación de la materia, sistema unidimensional

Fuente: (Chapra, 2008)

una tonalidad de color verde, y un pequeño mínimo en agosto representado con una tonalidad de color amarillo. En la parte alta llueve más que en la parte baja (precipitación anual promedio de 1210 mm en la parte alta y 860 mm en la parte baja), aunque de octubre hasta diciembre llueve un poco más en la parte baja de la microcuenca. (Empresa de Agua Potable Y Alcantarillado de la ciudad de Azogues, 2003)

3.1.1 Estudio mensual.

Tabla 6. Estadística mensual de precipitaciones

Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Coeficientes	Coeficientes	Coeficientes	Coeficientes	Coeficientes	Coeficientes	Coeficientes	Coeficientes	Coeficientes	Coeficientes	Coeficientes	Coeficientes
Min.: 18.40	Min.:42.48	Min.:37.94	Min.: 21.40	Min.: 38.40	Min.: 0.40	Min.: 9.917	Min.: 6.60	Min.:24.20	Min.: 25.21	Min.: 28.60	Min.: 1.94
Median: 60.21	Median:57.41	Median:66.21	Median:100.20	Median: 61.00	Median: 90.80	Median: 90.400	Median:59.20	Median:46.40	Median: 71.37	Median: 47.80	Median: 44.00
Mean: 63.86	Mean:60.61	Mean:64.77	Mean:101.23	Mean: 78.02	Mean: 83.86	Mean: 93.641	Mean:54.41	Mean:50.66	Mean: 70.80	Mean: 60.13	Mean: 45.00
Max.:101.14	Max.:95.81	Max.:95.80	Max.:200.43	Max.:139.43	Max.:167.20	Max.:144.605	Max.:78.60	Max.:96.61	Max.:109.20	Max.:109.42	Max.:100.41
S: 30.41	S:17.8127	S:21.12519	S:53.861	S:36.08713	S:51.93603	S:49.57538	S:24.67954	S:23.60754	S:37.36211	S:33.51524	S:29.05207
CV:47.62%	CV:29.39%	CV:32.61%	CV:53.21%	CV:46.25%	CV:61.93%	CV:52.94%	CV:45.36%	CV:46.60%	CV:52.77%	CV:55.73%	CV:64.56%

Fuente: Elaboración propia

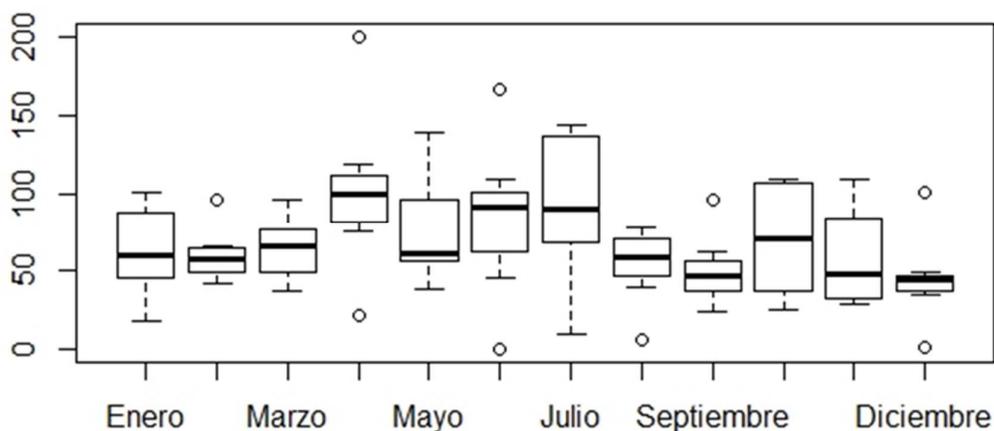


Figura 12. Estadística mensual de precipitaciones monitoreadas en la microcuenca del río Tabacay
Fuente: Elaboración propia

En la tabla 6 se representa el resumen estadístico mensual del comportamiento de las precipitaciones monitoreadas en un período de seis años en la microcuenca del río Tabacay.

La figura 12 representa los valores de precipitaciones monitoreados mensualmente durante seis años de análisis. El diagrama de caja correspondiente al mes de abril indica una intensidad alta de precipitaciones con un valor máximo promedio de 100.20 mm conforme a la época invernal del austro ecuatoriano, teniendo una desviación estándar de 53.861 mm que corresponde a una variabilidad del 53.21%. Se deduce que el comportamiento de la variabilidad de las precipitaciones en este mes puede estar entre un

rango de 154.06 a 100.2 *mm* de lluvia, esto refleja una alta variabilidad en el comportamiento pluviométrico de la microcuenca.

En el mes de diciembre se registra la menor intensidad de lluvias, con un valor mínimo promedio de 44 *mm* y con una desviación estándar de 29.052 *mm*, esta estadística significa que durante los meses de diciembre la microcuenca del río Tabacay soporta un temporal seco donde por lógica los caudales de las quebradas que conforman la microcuenca tienden a disminuir haciendo que la contaminación sea mucho más apreciable a simple vista.

Los valores máximos relevantes de precipitación suceden en los meses de: julio con un valor de 144.605 *mm*, seguido del mes de mayo con un valor de 139.43 *mm* y finalmente el mes de abril con un valor de 119.22 *mm*.

Por otra parte, los valores mínimos relevantes de precipitación suceden en los meses de: julio con un valor de 9.917 *mm*, seguido del mes de enero con un valor de 18.40 *mm* y finalmente el mes de septiembre con un valor de 24.20 *mm*.

Se producen eventos atípicos durante todo el período analizado, generándose un evento sumamente inusual en el mes de abril donde las lluvias alcanzan 200.43 *mm* en un solo mes de toma de datos, evento difícil de explicar debido a la inconcordancia con el resto de los valores monitoreados, pero que corresponde fielmente al mes más lluvioso que soporta la microcuenca.

Al ser la distribución de precipitación irregular en la microcuenca del río Tabacay, se presentan datos que no tienen promedios similares, ya que la intensidad y frecuencia de lluvias es distinto en la parte alta y baja de la microcuenca, pero los mismos datos representan fielmente lo expuesto en el Plan de Manejo Integral de la microcuenca del río Tabacay, donde se expone que la parte baja de la microcuenca del río Tabacay presenta dos pequeños máximos, en marzo y en octubre, y un pequeño mínimo en agosto, mientras tanto en la parte alta del Tabacay, la cantidad de precipitación presenta un máximo en junio y julio, y un mínimo de noviembre hasta febrero.

3.1.2 Estudio anual.

Tabla 7. Estadística anual de precipitaciones

2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Coeficientes						
Min.:25.21	Min.: 37.80	Min.:24.2	Min.: 35.40	Min.:28.6	Min.: 28.60	Min.: 0.400
Median:46.29	Median: 96.21	Median:78.7	Median: 65.20	Median:86.9	Median: 57.60	Median:29.545
Mean:49.05	Mean:101.43	Mean:76.39	Mean: 81.41	Mean:76.26	Mean: 70.07	Mean: 3.413
Max.:75.30	Max.:200.43	Max.:119.22	Max.:167.20	Max.:114.2	Max.:131.20	Max.:57.400
S:14.29548	S:43.78004	S:24.59677	S:40.10093	S:28.97724	S:35.49585	S:20.57462
CV:29.14%	CV:43.16%	CV:32.20%	CV:49.26%	CV:38%	CV:50.66%	CV:74.02%

Fuente: Elaboración propia

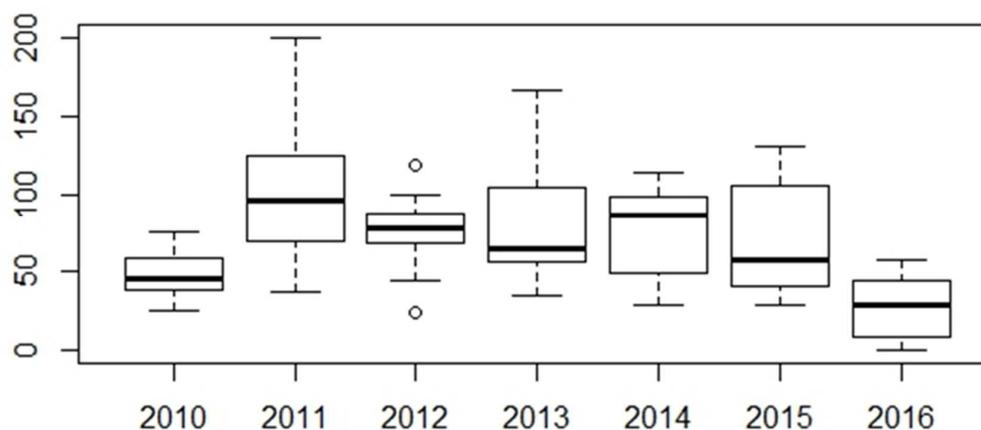


Figura 13. Estadística anual de precipitaciones monitoreadas en la microcuenca del río Tabacay
Fuente: Elaboración propia

En la tabla 7 se representa el resumen estadístico anual del comportamiento de las precipitaciones monitoreadas en un período de seis años en la microcuenca del río Tabacay.

La figura 13 representa las precipitaciones anuales monitoreadas desde el año 2010 hasta el año 2016. En ella se evidencia que en el año 2011 la microcuenca soporto la mayor época invernal de acuerdo al registro de lluvias monitoreadas durante todo ese año, presentando un valor promedio superior a todas las demás analizadas igual a 101.43 *mm* con una desviación estándar de 43.78 *mm* que corresponde a una variabilidad del 43.16%.

Por otra parte también se analiza que en el año 2016 la microcuenca ha experimentado un año sumamente seco a comparación de los años anteriores, pues presenta un valor mínimo promedio de 3.413 *mm*. Dato que es muy irrelevante, pues si se hace un estudio detallista comparando solo el mes de abril del año 2011 que presenta un máximo de 200.43 *mm* con todo el año 2016 que ostenta una media de 3.413 *mm*, se puede decir que en un solo mes del año 2011 llovió más que en todo el año 2016.

El coeficiente de variación es también un buen indicador del grado de variación de los datos en relación con la media, para el año 2011 que representa la mayor época invernal experimentada por la microcuenca del río Tabacay su coeficiente de variación es 43.16% y para el año 2016 que es el año más seco de los seis años de análisis su coeficiente de variación es 74.02%. Un $CV = 43.16\%$ significa que el conjunto de datos es variable o heterogéneo para el caso del año 2011; sin embargo, un $CV = 74.02\%$ significa una gran variación o heterogeneidad en el conjunto de datos, para el caso del año 2016.

Los valores máximos relevantes de precipitación suceden en los años 2011 con un valor de 200.43 *mm*, seguido del año 2013 con un valor de 167.20 *mm* y finalmente el año 2015 con un valor de 131.20 *mm*.

Por otra parte, los valores mínimos relevantes de precipitación suceden en los años: 2016 con un valor de 0.40 *mm*, seguido del año 2010 con un valor de 25.21 *mm* y finalmente los años 2014 y 2015 con un mismo valor de 28.60 *mm*.

Con base en los registros de lluvia se puede diseñar un sistema de gestión ambiental que involucre los diferentes actores sociales para la protección y conservación del recurso agua que ofrece este ecosistema, teniendo en cuenta las temporadas invernales y de estiaje que experimenta la microcuenca, con la única finalidad de la distribución óptima de este recurso.

3.2 Análisis de caudales.

El caudal es la cantidad de agua que pasa por un cierto tiempo a través de una sección. El caudal, siendo una de las más importantes variables en estudios hidrológicos se mide indirectamente en función del nivel de la corriente y la velocidad del flujo.

Para la modelación de las quebradas y el transporte de los contaminantes es necesario conocer parámetros hidrológicos como caudales, velocidades, precipitaciones y coeficientes de dispersión; además parámetros geométricos como profundidad, anchura, sección transversal y pendiente.

El estudio de los caudales circulantes es importante ya que por una parte su conocimiento es necesario para la calibración del modelo y por otra ayuda a aclarar y reforzar el análisis de la calidad del resto de las variables.

3.2.1 Análisis de los caudales registrados en la quebrada Llaucay.

3.2.1.1 Estudio Mensual.

Tabla 8. Estadística mensual de caudales registrados en la quebrada Llaucay

Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Coefficientes											
Min.:0.1200	Min.:0.1300	Min.:0.0900	Min.:0.1760	Min.:0.1875	Min.:0.1730	Min.:0.2058	Min.:0.1903	Min.:0.2224	Min.:0.1500	Min.:0.1663	Min.:0.1653
Median:0.3664	Median:0.3054	Median:0.2969	Median:0.2971	Median:0.3657	Median:0.4900	Median:0.4935	Median:0.2675	Median:0.3751	Median:0.2544	Median:0.3167	Median:0.2372
Mean:0.3189	Mean:0.2840	Mean:0.3885	Mean:0.3286	Mean:0.4865	Mean:0.4472	Mean:0.5769	Mean:0.4309	Mean:0.3895	Mean:0.3442	Mean:0.3378	Mean:0.2772
Max.:0.5593	Max.:0.5377	Max.:1.0660	Max.:0.5844	Max.:0.9165	Max.:0.7961	Max.:1.4297	Max.:0.8196	Max.:0.6545	Max.:0.5641	Max.:0.6117	Max.:0.4778
S:0.1915507	S:0.1474347	S:0.3466885	S:0.1398046	S:0.3071581	S:0.2145833	S:0.397622	S:0.259352	S:0.1368728	S:0.1823133	S:0.1407556	S:0.1153969
CV:60.06%	CV:51.91%	CV:89.23%	CV:42.54%	CV:63.13%	CV:47.99%	CV:68.92%	CV:60.19%	CV:35.14%	CV:52.96%	CV:41.66%	CV:41.63%

Fuente: Elaboración propia

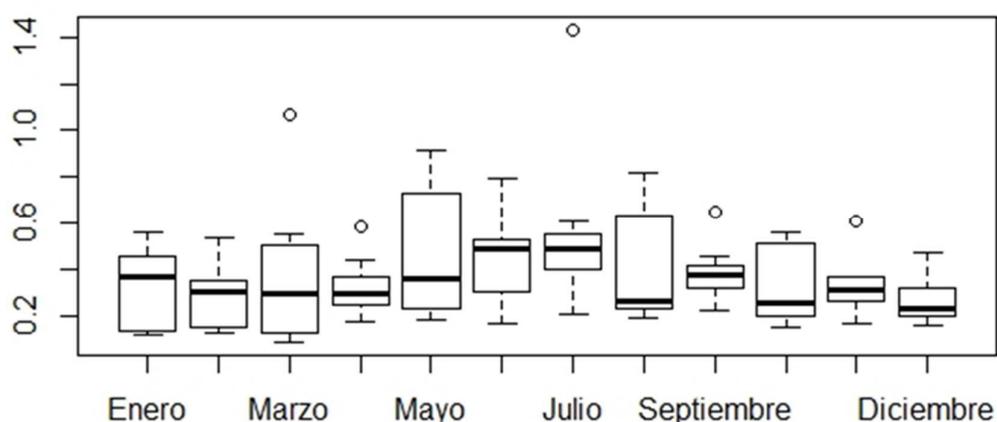


Figura 14. Caudales mensuales medidos en la quebrada Llaucay

Fuente: Elaboración propia

Para analizar los caudales en la microcuenca del río Tabacay es necesario tener en cuenta consideraciones como: que existe un solo punto de medición antes de las captaciones y que el método de medición de caudales es muy deficiente presentando valores con un gran margen de error y que a su vez solo son una aproximación del caudal real que circula por las quebradas. Al tener solo un punto de medición de caudales en cada quebrada en estudio, no se pueden conocer a ciencia cierta los valores de los caudales de disolución y se obvian diferentes eventos naturales o antropogénicos que pudiesen estar influyendo en la variación de los mismos.

En la tabla 8 se representa el resumen estadístico mensual del comportamiento de los caudales medidos durante seis años en la quebrada Llaucay.

En la figura 14 se presentan los valores de los caudales medidos mensualmente en la quebrada Llaucay, en ella es evidente el contraste con los datos de precipitación analizados anteriormente, pues se puede observar que existe una disminución notable de los caudales

en los meses de marzo, abril y octubre correspondientes a los meses de mayor intensidad de lluvia en la parte baja de la microcuenca de acuerdo al Plan de Manejo Integral de la microcuenca del río Tabacay. Como se explicó anteriormente es difícil de entender la razón de estos caudales tan bajos, si se supone que son épocas lluviosas en el austro ecuatoriano, la única explicación lógica que se puede sospechar es que en estos temporales existe una mayor demanda de agua por parte de la población ya sea para sus reservorios o para las actividades piscícolas a las que se dedica la población de la parte alta de la microcuenca.

En los meses de Junio y Julio se observa que son las temporadas de mayor caudal en la quebrada Llaucay, con valores máximos promedios de $0.44 \text{ m}^3 / \text{sg}$ y $0.49 \text{ m}^3 / \text{sg}$ respectivamente afirmando lo expuesto en el Plan de Manejo Integral de la microcuenca del río Tabacay, que da a entender que en estos meses existe altas precipitaciones en la parte alta de la microcuenca y así mismo se evidencia el descenso de los caudales desde noviembre hasta febrero.

El diagrama de caja correspondiente al mes de julio indica un evento sumamente atípico a comparación con el resto de los meses analizados, con un valor máximo de $1.43 \text{ m}^3 / \text{sg}$, teniendo una desviación estándar de $0.40 \text{ m}^3 / \text{sg}$ que corresponde a una variabilidad del 68.92%. Se deduce que el comportamiento de la variabilidad de los caudales registrados en este mes tiene datos heterogéneos; es decir, no existen valores comunes o que sigan una misma tendencia.

Los valores máximos relevantes de caudal registrados acontecen en los meses de: mayo con un valor de $0.9165 \text{ m}^3 / \text{sg}$, seguido del mes de agosto con un valor de $0.8196 \text{ m}^3 / \text{sg}$ y finalmente el mes de junio con un valor de $0.7961 \text{ m}^3 / \text{sg}$.

Por otra parte, los valores mínimos relevantes de caudal registrados acontecen en los meses de: marzo con un valor de $0.09 \text{ m}^3 / \text{sg}$, seguido del mes de enero con un valor de $0.12 \text{ m}^3 / \text{sg}$ y finalmente el mes de febrero con un valor de $0.13 \text{ m}^3 / \text{sg}$.

Conociendo estos datos se tiene una idea de la dinámica hidrológica de la quebrada Llaucay, dando la posibilidad de llevar a cabo una mejor gestión hidrológica que involucre el diseño de plantas de captación y distribución que se piensen construir a futuro.

3.2.1.2 Estudio anual.

Tabla 9. Estadística anual de los caudales registrados en la quebrada Llaucay

2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Coefficientes						
Min.:0.1100	Min.:0.0900	Min.:0.2372	Min.:0.2623	Min.:0.2372	Min.:0.2231	Min.:0.1414
Median:0.1745	Median:0.2169	Median:0.4475	Median:0.4140	Median:0.5006	Median:0.3821	Median:0.2221
Mean:0.2521	Mean:0.2423	Mean:0.4595	Mean:0.5512	Mean:0.4940	Mean:0.4512	Mean:0.2388
Max.:0.6117	Max.:0.4969	Max.:0.7961	Max.:1.4297	Max.:0.8497	Max.:1.0660	Max.:0.5591
S:0.1760985	S:0.1311494	S:0.1760623	S:0.3457507	S:0.1701757	S:0.2218525	S:0.115218
CV:69.86%	CV:54.13%	CV:38.32%	CV:62.73%	CV:34.45%	CV:49.17%	CV:48.25%

Fuente: Elaboración propia

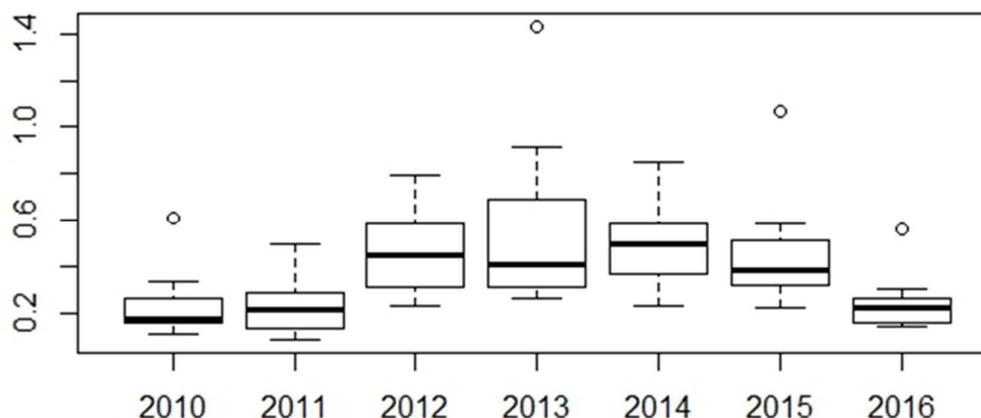


Figura 15. Caudales anuales medidos en la quebrada Llaucay

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 9 se representa el resumen estadístico anual del comportamiento de los caudales medidos durante seis años en la quebrada Llaucay.

La figura 15 muestra los promedios de los caudales medidos durante los seis años de monitoreo. En ella es evidente que para el año 2016 existe una disminución notable de los caudales, con un valor mínimo promedio de $0.22 \text{ m}^3/\text{sg}$ y con una desviación estándar de $0.12 \text{ m}^3/\text{sg}$ en base al promedio, ratificando lo expuesto anteriormente al analizar las precipitaciones donde claramente se evidenció que el año 2016 fue la temporada más seca que experimentó el Tabacay, condición que de acuerdo a los datos medidos por la EMAPAL podía a ver influencia directamente en el servicio de agua potable para la ciudad de Azogues.

En la figura 15 también se puede analizar que para el año 2011, los volúmenes de caudales descienden notablemente a pesar de ser el año más lluvioso registrado por la EMAPAL según sus datos de precipitación, lo que necesariamente da a entender que en épocas de lluvia es cuando la población consume más este recurso disminuyendo los caudales que circula por la quebrada Llaucay o simplemente es un error en la toma de datos de caudales o en el monitoreo de las precipitaciones, manejándose dos hipótesis que necesariamente tendrían que ser analizadas al momento de diseñar un sistema de gestión ambiental que proteja y conserve este ecosistema.

El coeficiente de variación para el año 2011, que indica el grado de variación de los datos con respecto a la media es igual a 54.13%, lo que significa que el conjunto de datos es heterogéneo; es decir, que no existe mucha lógica o relación entre dato y dato.

El diagrama de caja correspondiente al año 2013 indica un evento sumamente atípico a comparación con el resto de los años analizados, con un valor máximo de $1.4297 \text{ m}^3/\text{sg}$, teniendo una desviación estándar de $0.3458 \text{ m}^3/\text{sg}$ que corresponde a una variabilidad del 62.73%. Se deduce que el comportamiento de la variabilidad de los caudales registrados en este año tiene datos heterogéneos; es decir, no existen valores comunes o que sigan una misma tendencia.

Los valores máximos relevantes de caudal registrados acontecen en los años: 2013 con un valor de $0.92 \text{ m}^3/\text{sg}$, seguido del año 2014 con un valor de $0.8497 \text{ m}^3/\text{sg}$ y finalmente el año 2012 con un valor de $0.7961 \text{ m}^3/\text{sg}$.

Por otra parte, los valores mínimos relevantes de caudal registrados acontecen en los años: 2011 con un valor de $0.09 \text{ m}^3/\text{sg}$, seguido del año 2010 con un valor de $0.11 \text{ m}^3/\text{sg}$ y finalmente el año 2016 con un valor de $0.14 \text{ m}^3/\text{sg}$.

Como dato adicional también se analiza que en los últimos tres años monitoreados los caudales tienden a decrecer, causa que tendría que ser analizada por las autoridades pertinentes, con el objetivo crear medidas oportunas de gestión ambiental que garanticen sobre todo la distribución y disfrute de este recurso.

3.2.2 Análisis de los caudales registrados en la quebrada Cóndor Yacu.

3.2.2.1 Estudio mensual.

Tabla 10. Estadística mensual de los caudales registrados en la quebrada Cóndor Yacu

Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Coeficientes											
Min.:0.04000	Min.:0.0300	Min.:0.030	Min.:0.09113	Min.:0.04166	Min.:0.1442	Min.:0.1885	Min.:0.1307	Min.:0.1061	Min.:0.04852	Min.:0.02479	Min.:0.02479
Median:0.13	Median:0.13	Median:0.14	Median:0.18	Median:0.19	Median:0.20	Median:0.25	Median:0.34	Median:0.20	Median:0.13	Median:0.15	Median:0.15
Mean:0.17327	Mean:0.1467	Mean:0.16352	Mean:0.22936	Mean:0.25572	Mean:0.3161	Mean:0.2504	Mean:0.3233	Mean:0.2203	Mean:0.14297	Mean:0.12353	Mean:0.12353
Max.:0.57306	Max.:0.2586	Max.:0.45558	Max.:0.41380	Max.:0.74333	Max.:0.6961	Max.:0.3695	Max.:0.5327	Max.:0.3318	Max.:0.21573	Max.:0.21939	Max.:0.29595
S:0.1821681	S:0.07584348	S:0.1513865	S:0.1197986	S:0.2286711	S:0.206531	S:0.06723254	S:0.132269	S:0.08415103	S:0.06152111	S:0.06963137	S:0.08323387
CV:105.14%	CV:51.69%	CV:92.58%	CV:52.23%	CV:89.42%	CV:65.33%	CV:26.85%	CV:40.91%	CV:38.20%	CV:43.03%	CV:56.37%	CV:52.95%

Fuente: Elaboración propia

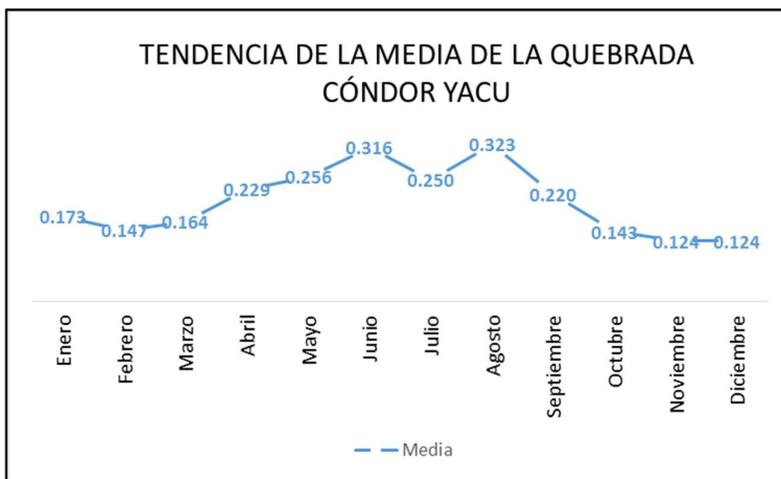


Figura 16. Valores promedios mensuales de los caudales registrados en la quebrada Cóndor Yacu

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 10 se representa el resumen estadístico mensual del comportamiento de los caudales medidos durante seis años en la quebrada Cóndor Yacu.

La figura 16 representa los promedios de los caudales medidos mensualmente durante seis años en la quebrada Cóndor Yacu. En ella se puede evidenciar caudales máximos promedios correspondientes al mes de junio y agosto con una media de $0.31\text{ m}^3/\text{sg}$ y $0.32\text{ m}^3/\text{sg}$ respectivamente, coincidiendo con la temporada invernal que experimenta la parte alta de la microcuenca y por otra parte también se puede observar que en los meses de noviembre hasta febrero es la época donde los caudales tienden a decrecer notablemente en comparación con el resto de los meses analizados. Existe un solo evento atípico registrado en el mes de mayo del 2014 donde se midió un caudal equivalente $0.74\text{ m}^3/\text{sg}$, al analizar todos los registros de caudales medidos en los meses de mayo

durante los seis años se obtuvo un coeficiente de variación equivalente a 89.42% lo que significa que los datos analizados son muy heterogéneos y no existe una lógica de resultados entre dato y dato.

En la figura 16 se muestra dos temporales opuestos que experimenta la quebrada Cóndor Yacu en base a sus medias analizadas, un temporal lluvioso que inicia en los meses de marzo hasta junio donde los caudales tienden a crecer notablemente y un temporal seco que empieza desde agosto donde sus caudales tienden a disminuir el resto del año hasta febrero. Al estudiar el comportamiento de los caudales dentro de la quebrada Cóndor Yacu se tiene una idea de los meses donde será más evidente la contaminación generada por los vertidos directos hacia la quebrada Cóndor Yacu, pues cuando los caudales tienden a disminuir las concentraciones de los contaminantes que ingresan al cuerpo de agua se mantienen largos períodos de tiempo haciendo que el sistema hídrico pierda su capacidad de autodepuración.

Los valores máximos relevantes de caudal registrados acontecen en los meses de: junio con un valor de $0.6961 \text{ m}^3/\text{sg}$, seguido del mes de agosto con un valor de $0.5327 \text{ m}^3/\text{sg}$ y finalmente el mes de abril con un valor de $0.41380 \text{ m}^3/\text{sg}$.

Por otra parte, los valores mínimos relevantes de caudal registrados acontecen en los meses de: noviembre con un valor de $0.02479 \text{ m}^3/\text{sg}$, seguido de los meses de febrero y marzo con un mismo valor de $0.030 \text{ m}^3/\text{sg}$ y finalmente el mes de enero con un valor de $0.040 \text{ m}^3/\text{sg}$.

3.2.2.2 Estudio anual.

Tabla 11. Estadística anual de los caudales registrados en la quebrada Cóndor Yacu

2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Coeficientes						
Min.:0.02479	Min.:0.04000	Min.:0.1549	Min.:0.1448	Min.:0.1198	Min.:0.1116	Min.:0.04166
Median:0.08057	Median:0.13998	Median:0.2332	Median:0.2021	Median:0.1851	Median:0.2107	Median:0.13157
Mean:0.09523	Mean:0.16922	Mean:0.2958	Mean:0.2366	Mean:0.2406	Mean:0.2324	Mean:0.18992
Max.:0.26922	Max.:0.36948	Max.:0.5731	Max.:0.5327	Max.:0.7433	Max.:0.4299	Max.:0.69607
S:0.07682828	S:0.1074139	S:0.1412215	S:0.1080027	S:0.1718153	S:0.1044372	S:0.1828562
CV:80.68%	CV:63.47%	CV:47.75%	CV:45.64%	CV:71.42%	CV:44.94%	CV:96.28%

Fuente: Elaboración propia

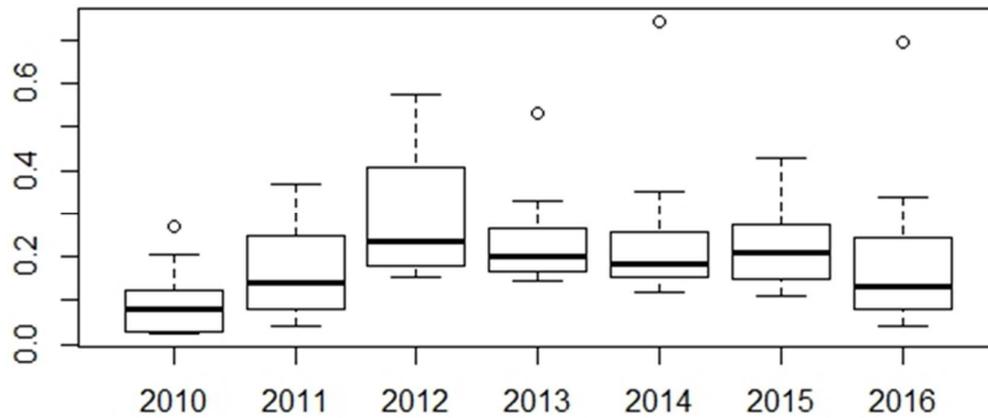


Figura 17. Caudales anuales medidos en la quebrada Cóndor Yacu
Fuente. Elaboración propia

En la tabla 11 se representa el resumen estadístico anual del comportamiento de los caudales medidos durante seis años en la quebrada Cóndor Yacu.

En la figura 17 se presentan los promedios anuales de los caudales medidos dentro de la quebrada Cóndor Yacu. En ella se observa que el promedio de los caudales en el año 2011 es de $0.16992 \text{ m}^3/\text{sg}$ y con una desviación estándar semejante a $0.11 \text{ m}^3/\text{sg}$ en relación a su media, siendo el segundo promedio de caudal más bajo registrado durante los seis años de medición, generándose un evento contraproducente en relación a las precipitaciones anuales estudiadas en la figura 13, donde en el año 2011 se registraron la mayor intensidad de lluvias, lo que da a entender que una vez más los datos se contraponen llegando a la teoría que mientras mayor es la intensidad de precipitación en la microcuenca, mayor es la demanda de agua por parte de la población que vive a las riveras de estos cursos de agua, haciendo que los caudales medidos antes de la captaciones disminuyan notablemente o simplemente es una falla en la medición de los caudales o monitoreo de las precipitaciones. Al calcular el coeficiente de variación de los datos medidos durante el año 2011 se tiene un valor de 63.47% lo que significa que los datos analizados tienen discrepancia uno con el otro y no poseen una tendencia lógica de resultados medidos.

En la figura 17 se evidencia claramente promedios mínimos de caudales, en el año 2010 y 2016 con medias de $0.08057 \text{ m}^3/\text{sg}$ y $0.13157 \text{ m}^3/\text{sg}$ respectivamente, coincidiendo con la figura 13 que indica que durante estos dos años se registraron descensos notables en los promedios de las precipitaciones anuales influyendo directamente en los caudales medidos en la quebrada Cóndor Yacu. A demás, se observa un evento sumamente atípico registrado en el mes de Mayo del 2014 donde se rastreó un caudal máximo de $0.7433 \text{ m}^3/\text{sg}$, valor

que coincide marcadamente con el evento pluviométrico máximo de 114.20 mm registrado ese mismo período de tiempo (año y mes).

Los valores máximos relevantes de caudal registrados acontecen en los años: 2012 con un valor de $0.5731 \text{ m}^3/\text{sg}$, seguido del año 2015 con un valor de $0.4299 \text{ m}^3/\text{sg}$ y finalmente el año 2011 con un valor de $0.36948 \text{ m}^3/\text{sg}$.

Por otra parte, los valores mínimos relevantes de caudal registrados acontecen en los años: 2010 con un valor de $0.02479 \text{ m}^3/\text{sg}$, seguido del año 2011 con un valor de $0.04000 \text{ m}^3/\text{sg}$ y finalmente el año 2016 con un valor de $0.04166 \text{ m}^3/\text{sg}$.

3.3 Análisis de las variables de calidad.

Para el desarrollo del modelo matemático se tomaron en cuenta diferentes variables de calidad de agua, las mismas que ayudarían a entender en qué condiciones se encuentran los cuerpos hídricos en análisis y suponer cuales serían las posibles causas para que se encuentren en esas condiciones. Se elige parámetros específicos de acuerdo al valor que presentan como indicador de calidad, según la disponibilidad de datos y por la importancia que tienen al ser agua destinada para el consumo de la población azogueña, tanto del área rural como urbana. Estas variables de calidad son las siguientes:

- Sólidos Suspendidos (S.S)
- Demanda Biológica de Oxígeno (DBO_5)
- Oxígeno Disuelto (O.D)
- Nitrógeno Orgánico (N.O)
- Nitrógeno Amoniacal (NH_4)
- Nitratos (NO_3)

A continuación se realiza un análisis de cada uno de los constituyentes de la red de calidad, de su evolución espacial y del grado de impacto que posee cada uno de ellos en las quebradas de Llaucay y Cóndor Yacu pertenecientes a la microcuenca del río Tabacay.

3.3.1 Sólidos Suspendidos.

Dentro de la microcuenca del río Tabacay la medición de sólidos suspendidos en sus aguas, es esencial para conocer el estado en el que se encuentra, pues debido al alto impacto generado por las actividades antropogénicas que en ella se desarrollan como la tala indiscriminada de los bosques y las fuertes precipitaciones que azota la parte alta de la microcuenca en épocas de invierno, existe arrastre considerable de sólidos suspendidos que afectan tanto las plantas de captación así como las plantas de tratamiento de aguas crudas.

En la tabla 12 se representa el resumen estadístico mensual del comportamiento de las concentraciones de sólidos suspendidos monitoreadas, en un período de seis años en la quebrada Llaucay perteneciente a la microcuenca del río Tabacay. Las celdas vacías teñidas de color amarillo fueron rellenas con un valor de cero, para calcular la estadística de datos de calidad, con el único objetivo de tener una idea del comportamiento de las concentraciones de sólidos suspendidos dentro del cuerpo de agua estudiado.

En la figura 18 se puede apreciar que el valor máximo promedio de las concentraciones de sólidos suspendidos ocurre en el mes de marzo con un valor de 50 mg/l y una desviación estándar de 254.58 mg/l que corresponde a una variabilidad del 192.45%. Se deduce que el elevado valor de la desviación estándar se debe al evento atípico registrado en el mes de marzo del 2015 con un valor de 708 mg/l que incrementan el rango de datos solamente en este período de tiempo. Por otra parte alta variabilidad de los datos representa que los valores monitoreados son cifras muy heterogéneas, que dan una idea de la alta inestabilidad de las concentraciones de sólidos suspendidos que entran a los cauces de la quebrada Llaucay.

En la figura 18 también se puede analizar que el valor mínimo promedio de las concentraciones de sólidos suspendidos ocurren en el mes de septiembre con un valor de 15.30 mg/l y una desviación estándar de 11.13 mg/l que corresponden a una variabilidad del 72.73 %. Evento que se podría ser cierto debido a que ese mismo período de tiempo existe un aumento del caudal promedio con referencia al mes de agosto, como se indica en la figura catorce. Caudales que favorecen a la dilución del contaminante.

Los valores máximos relevantes de concentración de sólidos suspendidos suceden en los meses de: junio con un valor de 488 mg/l , seguido del mes de mayo con un valor de 123 mg/l y finalmente el mes de octubre con un valor de 91 mg/l .

Por otra parte, los valores mínimos relevantes de concentración de sólidos suspendidos, sin tener en cuenta las casillas rellenas con un valor de cero, suceden en los meses de: septiembre con un valor de 0.02 mg/l , seguido del mes de marzo con un valor de 6 mg/l y finalmente el mes de noviembre con un valor de 9 mg/l .

En la figura 19 también se puede analizar que el valor mínimo promedio de las concentraciones de sólidos suspendidos ocurren en el mes de septiembre con un valor de 0.70 mg/l y una desviación estándar de 5.93 mg/l que corresponden a una variabilidad del 144.62 %. Evento que podría ser cierto debido a que en ese mismo período de tiempo existe un aumento del caudal promedio con referencia al mes de agosto, como se indica en la figura catorce. Caudales que favorecen a la dilución del contaminante.

El coeficiente de variación igual 114.62% indica que los datos monitoreados en ese período de tiempo son muy heterogéneos; es decir, no siguen una tendencia lógica entre ellos que podrían explicarlos.

El diagrama de caja correspondiente al mes de junio indica un evento sumamente atípico a comparación con el resto de los meses analizados, con un valor máximo de 776 mg/l , teniendo una desviación estándar de 291.56 mg/l que corresponde a una variabilidad del 253.85%. Evento atípico que coincide con la época invernal que soporta la parte alta de la microcuenca. Temporada invernal que puede ocasionar en base a las altas precipitaciones arrastre considerables de sólidos hacia los cursos de agua de la quebrada Cóndor Yacu.

Los valores máximos relevantes de concentración de sólidos suspendidos suceden en los meses de: mayo con un valor de 26 mg/l , seguido del mes de julio con un valor de 18 mg/l y finalmente el mes de agosto con un valor de 16 mg/l .

Por otra parte, los valores mínimos relevantes de concentración de sólidos suspendidos, sin tener en cuenta las casillas rellenas con un valor de cero, suceden en los meses de: septiembre con un valor de 0.70 mg/l , seguido de los meses de febrero, junio, octubre y noviembre con un mismo valor de 1 mg/l y finalmente los meses de marzo, abril y mayo con un mismo valor de 3 mg/l .

Las quebrada Cóndor Yacu presentan mayoritariamente concentraciones por debajo de los límites permisibles para sistemas naturales ($<35 \text{ mg/l}$ según la directiva del marco del agua), datos que son respaldados con los resultados de los análisis de laboratorio hecho durante el trabajo autónomo de campo. La legislación ecuatoriana para calidad de agua en el Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente (TULSMA) libro VI, no determina un límite permisible para sólidos suspendidos en sistemas naturales, razón por la cual se toma como referencia los 35 mg/l SS que determina la "Directiva Marco del Agua" referente a sistemas acuáticos naturales.

Al comparar las figuras 18 y 19 correspondientes a las concentraciones de sólidos suspendidos en las quebradas en estudio, se puede afirmar que la quebrada Llaucay presenta valores superiores durante los años analizados. Condición que podría ser cierta

debido a que la intensidad de las actividades antropogénicas es mayor en la quebrada Llaucay.

Al llevar a cabo estos análisis estadísticos se tiene una idea de que el monitoreo de la calidad hidrológica de la microcuenca no puede ser un elemento aislado de lo que ocurre en la llegada a la captación, razón por la cual es necesario monitorear la parte alta de la microcuenca con el fin de tener datos que permitan hacer un análisis correcto de la misma.

La figura 20 representa las concentraciones de sólidos suspendidos registrados en la quebrada Llaucay. En ellas se puede observar tres eventos atípicos que exceden los 100 mg SS/l, suscitados en los meses de mayo del 2012, mayo del 2014 y agosto del 2016. Eventos difíciles de explicar pues el sistema de monitoreo pluviométrico es deficiente y los valores de los caudales tienden a decrecer según el análisis estadístico realizado anteriormente, se puede suponer que son eventos aislados en alguna zona de la quebrada o tributario de la misma, teniendo en cuenta que estos valores altos de concentración de sólidos suspendidos podrían ser el resultado de la alta actividad antropogénica que experimenta la quebrada Llaucay.

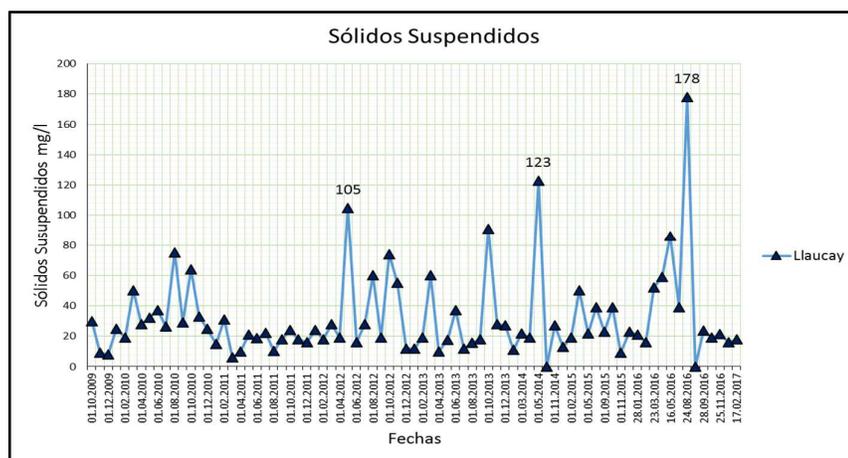


Figura 20. Concentración de Sólidos Suspendidos en la quebrada Llaucay
Fuente: Elaboración propia

de oxígeno disuelto tienen lugar en las épocas de invierno que experimenta la microcuenca del río Tabacay.

En la figura 21 también se puede analizar que el valor mínimo promedio de las concentraciones de oxígeno disuelto ocurre en el mes de noviembre con un valor de $7 \text{ mgO}_2/\text{l}$ y una desviación estándar de $0.20 \text{ mgO}_2/\text{l}$ que corresponden a una variabilidad del 2.83 %. Evento que podría ser cierto debido a que en ese mismo período de tiempo las precipitaciones tienden a decrecer afectando los niveles de caudales y las concentraciones de esta variable de calidad dentro de la quebrada Llaucay.

Los valores máximos relevantes de concentración de oxígeno disuelto suceden en los meses de: julio con un valor de $7.70 \text{ mgO}_2/\text{l}$, seguido del mes de junio con un valor de $7.60 \text{ mgO}_2/\text{l}$ y finalmente los meses de enero, abril, mayo, septiembre y octubre con un mismo valor de $7.40 \text{ mgO}_2/\text{l}$.

Por otra parte, los valores mínimos relevantes de concentración de oxígeno disuelto suceden en los meses de: mayo con un valor de $6.60 \text{ mgO}_2/\text{l}$, seguido del mes de marzo con un valor de $6.70 \text{ mgO}_2/\text{l}$ y finalmente el mes de abril con un valor de $6.75 \text{ mgO}_2/\text{l}$.

3.3.2.2 Quebrada Cóndor Yacu.

Tabla 15 Valores estadísticos mensuales de concentración de oxígeno disuelto (Q. Cóndor Yacu)

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
2010	7.15	7.2	7.15	7	7.1	7.2	7	7.5	7.1	7.2	7.1	7.4
2011	7.15	7.3	6.9	7.45	7.35	7.5	7.4	7.6	7.45	7.2	7.3	7.1
2012	7.3	7.2	7	7.5	7.6	7.7	7.6	7.8	7.8	7.6	7.25	7.3
2013	7.15	7	7.5	7.3	7.1	7.6	7.8	7.5	7.5	7.2	7.1	7.2
2014	7.175	6.8	7.4	7.2	7.3	7.7	7.8	7.3	7.45	7.45	7.2	7.15
2015	7.2	6.6	7.25	7.4	7.5	7.8	7.6	7.6	7.325	7.3	6.6	7.1
2016	7.45	7.15	7.35	7	7.1	7.55	7.4	7.5	7.2	7.4	9.74	8
	Coefficientes											
Máximo	7.45	7.30	7.50	7.50	7.60	7.80	7.80	7.80	7.80	7.60	9.74	8.00
Mínimo	7.15	6.60	6.90	7.00	7.10	7.20	7.00	7.30	7.10	7.20	6.60	7.10
Media	7.23	7.04	7.22	7.26	7.29	7.58	7.51	7.54	7.40	7.34	7.47	7.32
Mediana	7.18	7.15	7.25	7.30	7.30	7.60	7.60	7.50	7.45	7.30	7.20	7.20
Des.Estándar	0.11	0.25	0.22	0.21	0.20	0.20	0.28	0.15	0.23	0.15	1.03	0.32
Coe.Variación	1.56%	3.59%	3.01%	2.83%	2.81%	2.58%	3.72%	2.00%	3.07%	2.11%	13.75%	4.35%
Coe.Variación	1.56%	3.59%	3.01%	2.83%	2.81%	2.58%	3.72%	2.00%	3.07%	2.11%	13.75%	4.35%

Fuente: Elaboración propia

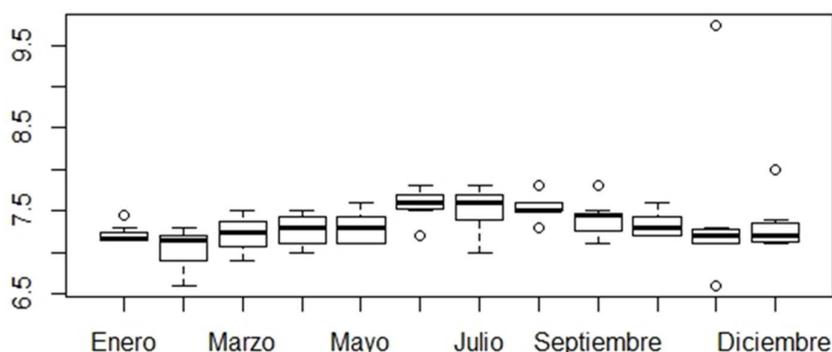


Figura 22. Promedios de las concentraciones de oxígeno disuelto (Q. Cóndor Yacu)

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 15 se representa el resumen estadístico mensual del comportamiento de las concentraciones de oxígeno disuelto, monitoreadas en un período de seis años en la quebrada Cóndor Yacu perteneciente a la microcuenca del río Tabacay.

En la figura 22 se puede apreciar que el valor máximo promedio de las concentraciones de oxígeno disuelto ocurre en el mes de junio con un valor de $7.58 \text{ mgO}_2/\text{l}$ y una desviación estándar de $0.20 \text{ mgO}_2/\text{l}$ que corresponde a una variabilidad del 2.58 %. Al tener un coeficiente de variación inferior al 30%, se puede decir que los valores monitoreados son homogéneos; es decir, no existe demasiada variabilidad entre las concentraciones de oxígeno disuelto medidos en la quebrada Cóndor Yacu. Además, se observa en la figura 22 que los máximos promedios de concentración de oxígeno disuelto tienen lugar en las épocas de invierno que experimenta la microcuenca del río Tabacay, evento natural que favorece al incremento de los caudales y de las concentraciones de esta variable de calidad.

En la figura 22 también se puede analizar que el valor mínimo promedio de las concentraciones de oxígeno disuelto ocurre en el mes de febrero con un valor de $7.04 \text{ mgO}_2/\text{l}$ y una desviación estándar de $0.25 \text{ mgO}_2/\text{l}$ que corresponden a una variabilidad del 3.59 %. Evento que podría ser cierto debido a que en ese mismo período de tiempo las precipitaciones tienden a decrecer afectando los niveles de caudales y las concentraciones de esta variable de calidad dentro de la quebrada Cóndor Yacu.

El diagrama de caja correspondiente al mes de noviembre indica un evento sumamente atípico a comparación con el resto de los meses analizados, con un valor máximo de $9.74 \text{ mg O}_2/\text{l}$, teniendo una desviación estándar de $1.03 \text{ mg O}_2/\text{l}$ que corresponde a una variabilidad del 13.75 %. Evento atípico que coincide con la época de estiaje que soporta la microcuenca, y que al comparar con la figura 16 que representa los caudales promedios medidos en la quebrada Cóndor Yacu, se analiza que no existe variación de los niveles de caudales en los meses de octubre, noviembre y diciembre, razón por la cual se llega a la conclusión de que existió un derrame puntual de agua que provocó el aumento de los caudales y la variación de las concentraciones de oxígeno disuelto.

Los valores máximos relevantes de concentración de oxígeno disuelto suceden en los meses de: junio y julio con mismo un valor de $7.80 \text{ mgO}_2/\text{l}$, seguido de los meses de mayo y octubre con un mismo valor de $7.60 \text{ mgO}_2/\text{l}$ y finalmente los meses de marzo y abril con un mismo valor de $7.50 \text{ mgO}_2/\text{l}$.

Por otra parte, los valores mínimos relevantes de concentración de oxígeno disuelto suceden en los meses de: febrero con un valor de $6.60 \text{ mgO}_2/\text{l}$, seguido del mes de marzo

con un valor de $6.90\text{ mgO}_2/\text{l}$ y finalmente los meses de abril y julio con un mismo valor de $7.00\text{ mgO}_2/\text{l}$.

El análisis de porcentaje de saturación indica si las concentraciones medidas son próximas a las concentraciones naturales. Las temperaturas medidas en las quebradas en análisis varían entre los 11 y 18°C , dando concentraciones de oxígeno de saturación en gran parte de la microcuenca entre los 9.6 y $11\text{ mgO}_2/\text{l}$ de acuerdo a la tabla 3.

En la figura 23 se exponen las concentraciones de oxígeno disuelto para las quebradas de Llaucay y Cóndor Yacu. Los valores de concentración de oxígeno varían entre los 6.5 y $8.01\text{ mgO}_2/\text{l}$, indicando que existe una disminución del oxígeno de saturación en relación a los valores de 9.6 y $11\text{ mgO}_2/\text{l}$ que deberían tener las quebradas a esas temperaturas en estado natural, descenso que puede deberse a factores como la presión atmosférica y la salinidad que intervienen directamente en las concentraciones de oxígeno disuelto.

Es necesario recalcar que según los datos proporcionados por la EMAPAL, existen valores que no siguen la misma tendencia del resto, los mismos que son interpretados como eventos atípicos dentro de los flujos de agua.

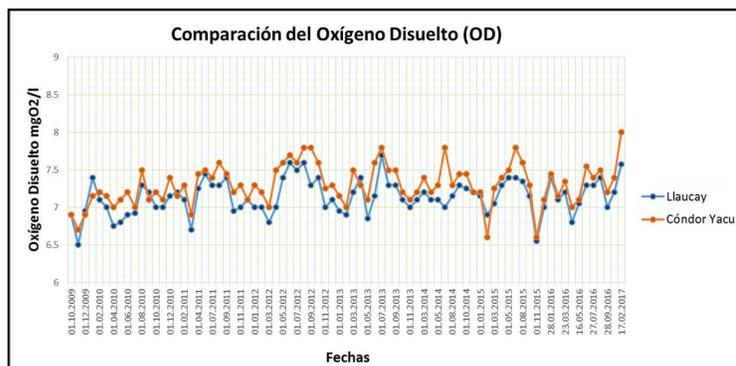


Figura 23. Concentración Temporal de Oxígeno Disuelto de las quebradas Llaucay y Cónдор Yacu
Fuente: Elaboración propia

El modelo matemático a diseñar toma en cuenta el consumo de oxígeno en el cuerpo de agua, llevado a cabo por procesos naturales como: la demanda de oxígeno desde el sedimento, el consumo de oxígeno para la degradación de la materia orgánica y la transformación de nitrógeno amoniacal a nitratos proceso conocido como nitrificación. Aunque no se cuenta con información exacta sobre los valores de estos procesos en los cuerpos hídricos en estudio, es necesario que para la etapa de simulación del modelo de calidad de agua se estimen valores para ajustar el modelo a la dinámica hidrológica de las quebradas en observación.

Demanda Biológica de Oxígeno: La demanda biológica de oxígeno es una medida aproximada de la cantidad de materia orgánica biodegradable presente en el agua. La materia orgánica presente en las aguas naturales procede del arrastre de nutrientes por acción de la escorrentía superficial, la cual va lavando los suelos agrícolas y ganaderos de la microcuenca, a su vez también la materia orgánica se encuentra en los cuerpos de aguas naturales debido al proceso metabólico que experimentan los organismos acuáticos. Aguas en estado natural suelen presentar concentraciones de DBO_5 inferiores a 2 mg/l mientras aguas con influencia antropogénica pueden presentar valores superiores a 10 mg/l .

Los suelos de la microcuenca del río Tabacay son atareados por actividades agrícolas y ganaderas de forma intensiva, razón por la cual las escorrentías superficiales que desembocan en las quebradas poseen una alta concentración de materia orgánica, disminuyendo la cantidad de oxígeno disuelto en el agua.

Las concentraciones de la materia orgánica como la DBO_5 se encuentra mayoritariamente en niveles por debajo de los 2 mg/l , siendo necesario recalcar que en los datos proporcionados por la EMAPAL, existen datos que no siguen la misma tendencia del resto, los mismo serán interpretados como eventos atípicos dentro de los flujos de agua.

3.3.2.3 Quebrada Llaucay (DBO_5).

Tabla 16. Valores estadísticos mensuales de la DBO_5 (Q. Llaucay)

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
2010	1.2	0.7	0.7	0.3	0.5	0.5	0.8	0.2	0.4	0.5	1	0.8
2011	0.75	0.4	0.4	0.4	2.9	0.7	0.6	2	0.7	0.2	0.3	0.4
2012	0.3	0.2	0.4	0.7	0.5	0.45	0.5	0.6	0.88	1.4	0.88	0.33
2013	0.1	1.05	0.8	0.45	1	0.2	2.3	0.55	0.45	0.99	0.4	0.99
2014	0.3	0.4	0.7	0.4	0.6	0.925	5.55	4.25	0.4	0.3	0.4	0.4
2015	0.48	0.4	2	0.7	0.4	1.65	0.18	0.3	0.55	0.25	0.73	0.55
2016	1.5	0.68	0.25	0.2	0.38	1.5	0.18	0.5	0.4	0.3	0.40	0.4
	Coficientes											
Máximo	1.50	1.05	2.00	0.70	2.90	1.65	5.55	4.25	0.88	1.40	1.00	0.99
Mínimo	0.10	0.20	0.25	0.20	0.38	0.20	0.18	0.20	0.40	0.20	0.30	0.33
Media	0.66	0.55	0.75	0.45	0.90	0.85	1.44	1.20	0.54	0.56	0.59	0.55
Mediana	0.48	0.40	0.70	0.40	0.50	0.70	0.60	0.55	0.45	0.30	0.40	0.40
Des.Estándar	0.52	0.28	0.59	0.19	0.91	0.55	1.95	1.47	0.19	0.46	0.28	0.25
Coe.Variación	78.33	51.66	78.22	42.07	101.14	64.63	134.99	122.78	34.50	81.25	47.37	45.03
Coe.Variación	78.33%	51.66%	78.22%	42.07%	101.14%	64.63%	134.99%	122.78%	34.50%	81.25%	47.37%	45.03%

Fuente: Elaboración propia

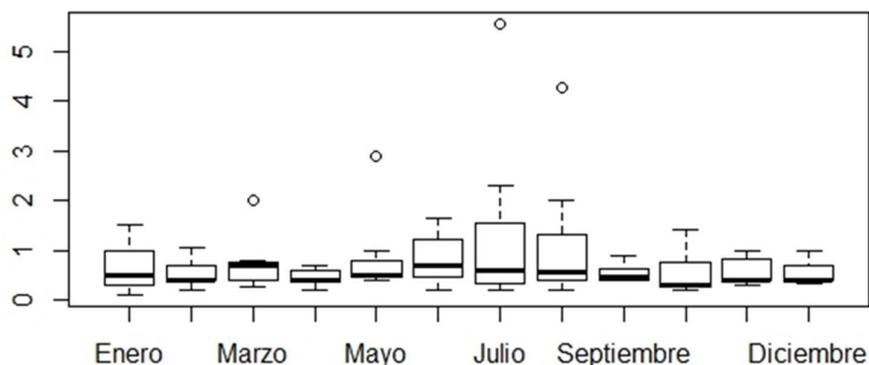


Figura 24. Promedios de las concentraciones de la DBO₅ (Q. Llaucay)

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 16 se representa el resumen estadístico mensual del comportamiento de las concentraciones de la DBO₅, monitoreadas en un período de seis años en la quebrada Llaucay perteneciente a la microcuenca del río Tabacay.

En la figura 24 se puede apreciar que el valor máximo promedio de las concentraciones de la DBO₅ tiene lugar en el mes junio con un valor de $0.85 \text{ mgO}_2/\text{l}$ y una desviación estándar de $0.55 \text{ mgO}_2/\text{l}$ que corresponde a una variabilidad del 64.63 %. Se deduce que el comportamiento de la variabilidad de las concentraciones de la DBO₅ en este mes puede estar en un rango de 1.4 a $0.85 \text{ mgO}_2/\text{l}$ de concentración, estos valores reflejan una variabilidad con concentraciones de DBO₅ que no afectan el sistema acuático. Por su parte al tener un coeficiente de variación inferior al 70%, significa que los resultados de las concentraciones de la DBO₅ son heterogéneos; es decir, no existe mucha variabilidad entre los datos analizados en este período de tiempo.

En la figura 24 también se puede analizar que el valor mínimo promedio de las concentraciones de la DBO₅ ocurre en el mes de abril con un valor de $0.45 \text{ mgO}_2/\text{l}$ y una desviación estándar de $0.19 \text{ mgO}_2/\text{l}$ que corresponden a una variabilidad del 42.07 %. Evento que coincide con el temporal invernal que experimenta la microcuenca, donde las precipitaciones son más frecuentes influyendo en los niveles de caudales y las concentraciones de esta variable de calidad dentro de la quebrada Llaucay.

El diagrama de caja correspondiente al mes de julio indica un evento sumamente atípico a comparación con el resto de los meses analizados, con un valor máximo de $5.55 \text{ mg O}_2/\text{l}$, teniendo una desviación estándar de $1.95 \text{ mg O}_2/\text{l}$ que corresponde a una variabilidad del 134.99 %. Evento atípico que a pesar de su alta concentración de DBO₅, no representa contaminación dentro del cuerpo de agua en estudio.

Un coeficiente de variación igual 134.99 % representa una alta variabilidad; es decir, los valores de las concentraciones de esta variable de calidad para el mes de julio son muy heterogéneos unos con otros.

Los valores máximos relevantes de concentración de DBO_5 suceden en los meses de: julio con un valor de $2.3 \text{ mgO}_2/\text{l}$, seguido del mes de agosto con un valor de $2 \text{ mgO}_2/\text{l}$ y finalmente el mes de junio con un valor de $1.65 \text{ mgO}_2/\text{l}$.

Por otra parte, los valores mínimos relevantes de concentración de DBO_5 suceden en los meses de: enero con un valor de $0.10 \text{ mgO}_2/\text{l}$, seguido del mes de julio con un valor de $0.18 \text{ mgO}_2/\text{l}$ y finalmente los meses de febrero, abril, junio, agosto y octubre con un mismo valor de $0.20 \text{ mgO}_2/\text{l}$.

3.3.2.4 Quebrada Cóndor Yacu (DBO_5).

Tabla 17. Valores estadísticos mensuales de la DBO_5 (Q. Llaucay)

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
2010	0.9	0.3	0.7	0.1	0.1	0.1	0.4	0.1	0.2	0.4	0.4	0.4
2011	0.4	0.3	0.3	0.3	0.2	0.3	0.4	3.5	0.6	0.2	0.2	0.2
2012	0.2	0.2	0.2	0.8	0.4	0.2	0.5	0.4	0.4	0.88	0.88	0.3
2013	0.2	0.88	0.6	0.3	0.88	0.2	0.65	0.15	0.38	0.99	0.4	0.99
2014	0.2	0.3	0.2	0.2	0.4	0.2	0.2	0.1	0.1	0.4	0.3	0.3
2015	0.2	0.15	0.18	1.1	0.2	1.85	3.2	0.28	0.4	0.1	0.3	0.3
2016	0.38	0.43	0.15	0.1	0.2	0.28	0.13	0.25	0.45	0.4	0.3	0.33
	Coefficientes											
Máximo	0.90	0.88	0.70	1.10	0.88	1.85	3.20	3.50	0.60	0.99	0.88	0.99
Mínimo	0.20	0.15	0.15	0.10	0.10	0.10	0.13	0.10	0.10	0.10	0.20	0.20
Media	0.35	0.37	0.33	0.41	0.34	0.45	0.78	0.68	0.36	0.48	0.40	0.40
Mediana	0.20	0.30	0.20	0.30	0.20	0.20	0.40	0.25	0.40	0.40	0.30	0.30
Des.Estándar	0.26	0.24	0.22	0.38	0.26	0.62	1.08	1.25	0.16	0.33	0.22	0.27
Coe.Variación	72.49	66.56	67.10	92.89	77.37	139.11	137.97	182.61	45.53	69.00	56.34	65.90
Coe.Variación	72.49%	66.56%	67.10%	92.89%	77.37%	139.11%	137.97%	182.61%	45.53%	69.00%	56.34%	65.90%

Fuente: Elaboración propia

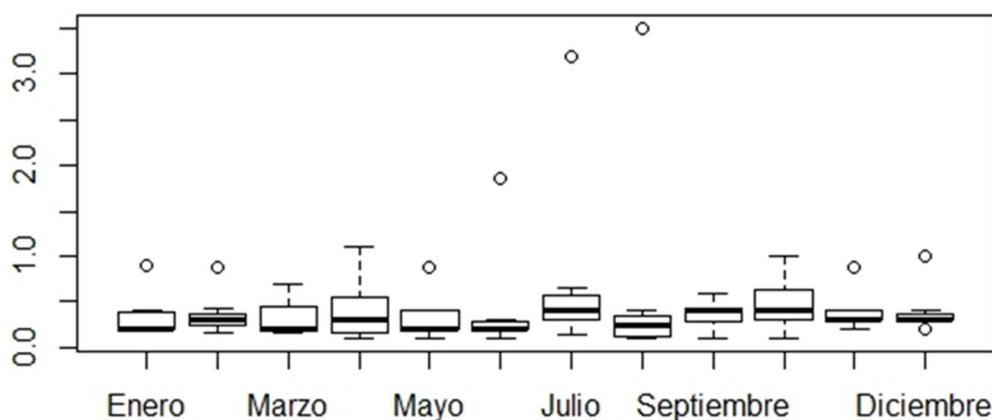


Figura 25. Promedios de las concentraciones de la DBO_5 (Q. Cóndor Yacu)
Fuente: Elaboración propia

En la tabla 17 se representa el resumen estadístico mensual del comportamiento de las concentraciones de la DBO_5 , monitoreadas en un período de seis años en la quebrada Cóndor Yacu perteneciente a la microcuenca del río Tabacay.

En la figura 25 se puede observar que el valor máximo promedio de las concentraciones de la DBO_5 tiene lugar en el mes octubre con un valor de $0.48 \text{ mgO}_2/\text{l}$ y una desviación estándar de $0.33 \text{ mgO}_2/\text{l}$ que corresponde a una variabilidad del 69 %. Se deduce que el comportamiento de la variabilidad de las concentraciones de la DBO_5 en este mes puede estar en un rango de 0.81 a $0.48 \text{ mgO}_2/\text{l}$ de concentración, estos valores reflejan una variabilidad con concentraciones de DBO_5 que no afectan el sistema acuático. Por su parte al tener un coeficiente de variación inferior al 70%, significa que los resultados de las concentraciones de la DBO_5 son heterogéneos; es decir, no existe mucha variabilidad entre los datos analizados en este período de tiempo

En la figura 25 también se puede analizar que el valor mínimo promedio de las concentraciones de la DBO_5 ocurre en el mes de enero con un valor de $0.20 \text{ mgO}_2/\text{l}$ y una desviación estándar de $0.26 \text{ mgO}_2/\text{l}$ que corresponden a una variabilidad del 72.49 %. Evento que coincide con el temporal seco que experimenta la microcuenca, donde la intensidad pluviométrica es baja influyendo en los niveles de los caudales y las concentraciones de oxígeno disuelto de acuerdo a las figuras estadísticas analizadas anteriormente para este período de tiempo dentro de la quebrada Cóndor Yacu. Al no existir arrastre considerable de materia orgánica hacia los cursos de agua por acción de las precipitaciones o de los elevados caudales los niveles de la DBO_5 tiende a decrecer en las temporales secas, salvo el caso de que exista derrames puntuales de agua residual con alto contenido de materia orgánica dentro sistema hídrico que provoque el incremento de las concentraciones de esta variable de calidad.

El diagrama de caja correspondiente al mes de agosto indica un evento sumamente atípico a comparación con el resto de los meses analizados, con un valor máximo de $3.50 \text{ mg O}_2/\text{l}$, teniendo una desviación estándar de $1.25 \text{ mg O}_2/\text{l}$ que corresponde a una variabilidad del 182.61 %. Evento atípico que a pesar de su alta concentración de DBO_5 , no representa contaminación dentro del cuerpo de agua en estudio. A demás, al tener un $CV = 182.61 \%$, indica que los resultados de las concentraciones de la DBO_5 son valores sumamente heterogéneos; es decir, no existe una relación matemática entre dato y dato.

Los valores máximos relevantes de concentración de DBO_5 suceden en los meses de: abril con un valor de $1.10 \text{ mgO}_2/\text{l}$, seguido del mes de octubre con un valor de $0.99 \text{ mgO}_2/\text{l}$ y finalmente el mes de marzo con un valor de $0.70 \text{ mgO}_2/\text{l}$.

Por otra parte, los valores mínimos relevantes de concentración de DBO_5 suceden en los meses de: abril, mayo, junio agosto, septiembre y octubre con un mismo valor de $0.10 \text{ mgO}_2/\text{l}$, seguido del mes de julio con un valor de $0.13 \text{ mgO}_2/\text{l}$ y finalmente los meses de febrero y marzo con un mismo valor de $0.15 \text{ mgO}_2/\text{l}$.

orgánico procedente de los vertimientos directos de aguas residuales domésticas, industriales o producida por la escorrentía quien arrastra los fertilizantes hacia los cuerpos de agua. El nitrógeno amoniacal, es por lo tanto, un indicador de contaminación de origen orgánico.

De acuerdo a la disponibilidad de datos se realiza el análisis de las concentraciones de amonio para las quebradas de Llaucay y Córdor Yacu desde el mes de enero del año 2010 hasta el mes de diciembre del año 2016. Es necesario recalcar que en los datos proporcionados por la EMAPAL, existen datos que no siguen la misma tendencia del resto, mismo que son analizados como eventos atípicos dentro de los flujos de agua.

Los datos de nitrógeno amoniacal, nitritos y nitratos son tomados a unos metros de las captaciones por parte de la EMAPAL, valores que no representan la realidad de este sistema hídrico, debido a la falta de estaciones de monitoreo en la parte alta de la microcuenca.

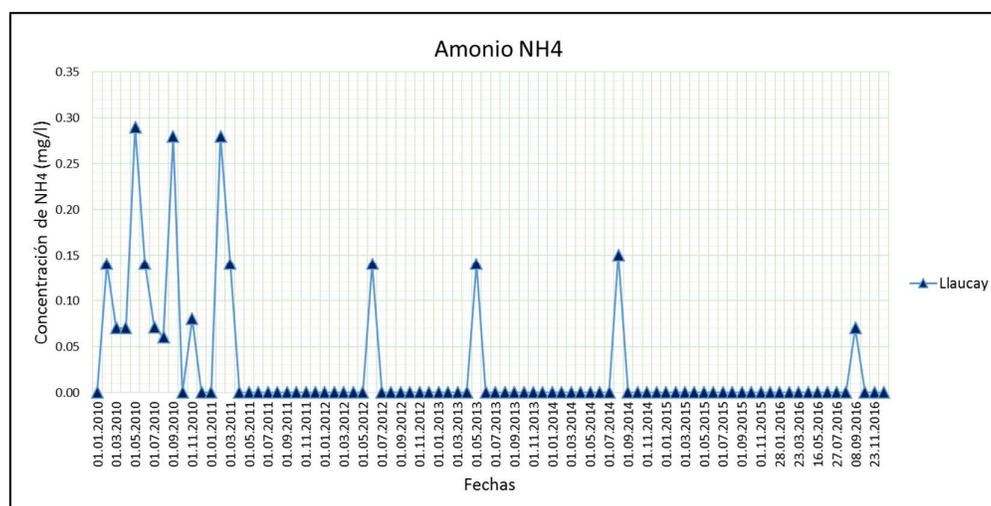


Figura 27 Concentración de Amonio NH₄ para la quebrada Llaucay
Fuente: Elaboración propia

La figura 27 muestra las concentraciones de nitrógeno amoniacal medidas durante los seis años en la quebrada Llaucay. Las concentraciones de amonio en esta quebrada se encuentran por debajo de los límites permisibles para sistemas hídricos naturales, solamente en los meses de mayo y septiembre del año 2010 y en el mes de febrero del año 2011 se puede observar valores por encima de los registrados el resto de los años, 0.29, 0.28 y 0.28 mg/l respectivamente. Aunque no son valores indicadores de contaminación, al momento de analizar junto con los datos de los caudales tomados en las estaciones de aforo, los datos de las precipitaciones a nivel de la microcuenca y las concentraciones de oxígeno disuelto se puede llevar a cabo las siguientes suposiciones:

para el mes de mayo existe un aumento en las concentraciones de oxígeno disuelto y en los caudales pero existe una disminución en las precipitaciones, lo que da a entender que el aumento de los caudales podría deberse a derrames puntuales de aguas residuales hacia las quebradas variando las concentraciones de oxígeno disuelto y de nitrógeno amoniacal, por su parte para los meses de septiembre y febrero existe una disminución en la concentración de oxígeno disuelto pero un aumento en los caudales y las precipitaciones, lo que da a juzgar que existió derrames considerables de aguas residuales en grandes volúmenes que propicio el aumento de los caudales sumado a esto las altas precipitaciones que afecto las concentraciones de oxígeno disuelto, resultando ser eventos esporádicos suscitados en la quebrada Llaucay.

Para la quebrada Llaucay (figura 27), se pueden apreciar muchos valores con concentraciones igual a 0 mg/l, valores que podrían darse debido a las variaciones de flujo propias de la quebrada, que disminuyen las concentraciones de nitrógeno amoniacal, haciendo que en muchos de los casos sus valores sean no detectables o simplemente son el resultado de manipulación incorrecta de las muestras de agua. Los datos en cero no afectan el diseño del modelo matemático, sencillamente se ajusta el modelo de calidad de agua a todos los valores observados

Se tendría complicaciones en el modelo siempre y cuando existan datos en blanco, series de calidad discontinuas en el tiempo u eventos atípicos que son difíciles de simular para el modelo matemático de calidad.

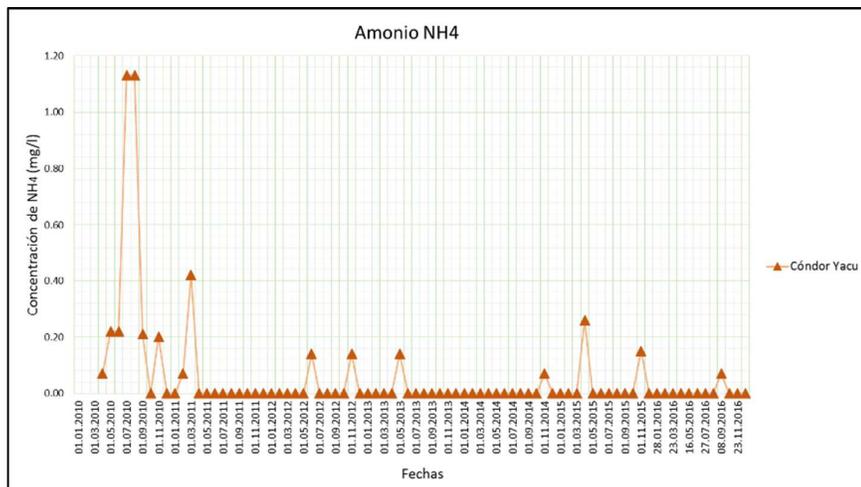


Figura 28. Concentración de Amonio NH₄ para la quebrada Cóndor Yacu
Fuente: Elaboración propia

La figura 28 muestra las concentraciones de nitrógeno amoniacal medidas durante los seis años en la quebrada Cóndor Yacu. Las concentraciones en esta quebrada se

encuentran dentro de los rangos permisibles para sistemas hídricos naturales sin contaminación, solamente en los meses de julio y agosto del año 2010 se registran datos superiores al resto de los meses analizados con un valor de 1.13 mg/l . Las concentraciones de amonio registradas en los eventos atípicos no poseen una analogía entre los datos de precipitación a nivel de la microcuenca, los datos de caudales en las estaciones de aforo y los datos de oxígeno disuelto, ya que las concentraciones oxígeno disuelto presenta un aumento esta temporada, mientras que según los datos de precipitación a nivel de la microcuenca y los caudales en las estaciones de aforo experimentan un decrecimiento considerable que se contrapone a las cantidades de oxígeno disuelto. Llegando a la conclusión que simplemente la medición de este parámetro fue defectuosa.

3.3.3.2 Nitritos.

La mayoría de los resultados de las concentraciones de nitritos analizados en el período de seis años por la EMAPAL en las quebradas de Llaucay y Cóndor Yacu no son detectados por el análisis ($<0.002 \text{ ug/l}$). Esto indicaría que la presencia de nitritos en los cuerpos de agua es parca, tal vez por paso violento que se da de nitritos a nitratos.

Aunque existan datos cuyas concentraciones son excesivamente elevadas a comparación del resto de los valores analizados. Es necesario recalcar que las unidades de concentración de nitritos están en “ug/l” y que estos valores siguen siendo cantidades inofensivas para hablar de contaminación por nitritos dentro de los cursos de agua.

3.3.3.3 Nitratos.

Al igual que en los análisis anteriores se tienen los resultados de las muestras de agua tomadas en las plantas de captación en un período de monitoreo que inicia en el mes de enero del año 2010 hasta el mes diciembre del año 2016. Datos proporcionados por la EMAPAL, los mismo que no reflejan lo que verdaderamente ocurre dentro de la microcuenca del río Tabacay, ya que son datos medidos en un solo punto de la quebrada, ignorando diferentes variables que podrían disminuir o aumentar la concentración de nitratos aguas arriba, a su vez existen datos que no siguen la misma tendencia del resto, que serán analizados como eventos atípicos dentro de los flujos de agua.

Para asegurar la confiabilidad de los datos proporcionados por la EMAPAL se procedió a establecer puntos de calidad en diferentes tramos de las quebradas en estudio, empezando desde las captaciones hacia aguas arriba. En estos puntos de calidad se tomaron muestras de agua para analizar las concentraciones de nitratos y comparar con los datos proporcionados por la EMAPAL y poder de alguna manera justificar los eventos atípicos.

Quebrada Llaucay

Tabla 18. Valores estadísticos mensuales de concentración de nitratos (Q. Llaucay)

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
2010	0.14	0.14	0.4	0.08	0.03	0.06	0.11	0.11	0.06	0.08	0.11	0.04
2011	0.08	0.07	0.06	0.07	0.11	0.03	0.15	0.12	0.09	0.1	0.06	0.07
2012	0.09	0.07	0.09	0.06	0.07	0.09	0.11	0.15	0.1	0.17	0.07	0.09
2013	0.09	0.1	0.07	0.12	0.11	0.09	0.11	0.05	0.09	0.08	0.08	0.16
2014	0.1	0.05	0.08	0.05	0.11	0.09	0.13	0.16	0.1	0.1	0.06	0.15
2015	0.12	0.055	0.14	0.09	0.24	0.11	0.11	0.26	0.13	0.12	0.09	0.15
2016	0.11	0.07	0.14	0.15	0.22	0.26	0.14	0.07	0.056	0.08	0.07	0.1
	Coefficientes											
Máximo	0.14	0.14	0.40	0.15	0.24	0.26	0.15	0.26	0.13	0.17	0.11	0.16
Mínimo	0.08	0.05	0.06	0.05	0.03	0.03	0.11	0.05	0.06	0.08	0.06	0.04
Media	0.10	0.08	0.14	0.09	0.13	0.10	0.12	0.13	0.09	0.10	0.08	0.11
Mediana	0.10	0.07	0.09	0.08	0.11	0.09	0.11	0.12	0.09	0.10	0.07	0.10
Des.Estándar	0.02	0.03	0.12	0.04	0.08	0.07	0.02	0.07	0.03	0.03	0.02	0.05
Coe.Variación	19.85	39.29	85.02	39.88	60.02	70.43	13.41	52.61	28.34	31.25	23.33	42.35
Coe.Variación	19.85%	39.29%	85.02%	39.88%	60.02%	70.43%	13.41%	52.61%	28.34%	31.25%	23.33%	42.35%

Fuente: Elaboración propia

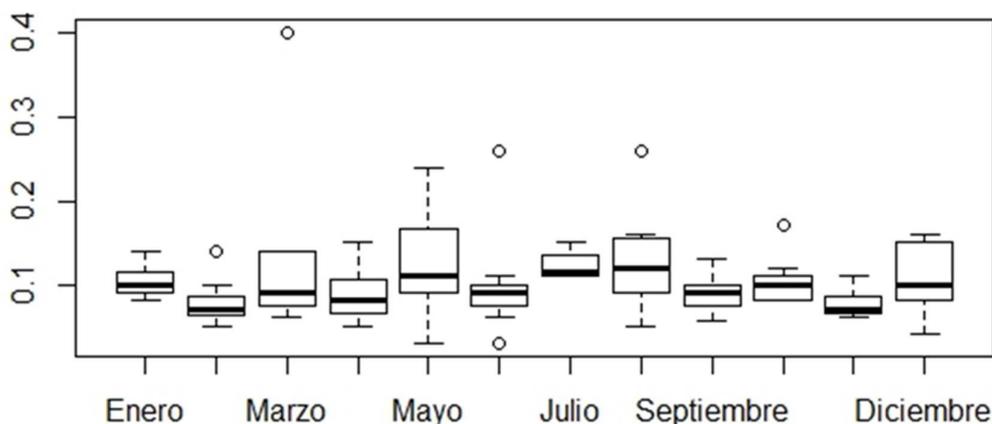


Figura 29. Promedios de las concentraciones de nitratos (Q. Llaucay)

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 18 se representa el resumen estadístico mensual del comportamiento de las concentraciones de nitratos, monitoreadas en un período de seis años en la quebrada Llaucay perteneciente a la microcuenca del río Tabacay.

En la figura 29 se puede observar que el valor máximo promedio de las concentraciones de nitratos ocurre en el mes mayo con un valor de 0.13 mg/l y una desviación estándar de 0.08 mg/l que corresponde a una variabilidad del 60.02 %. Se deduce que el comportamiento de la variabilidad de las concentraciones de nitratos en este período de tiempo pueden estar en un rango de 0.21 a 0.13 mg/l de concentración, valores que no indican contaminación generada por la presencia de nitratos en el sistema acuático, pues de acuerdo al TULSMA para hablar de contaminación dentro de los sistemas acuáticos naturales la concentración de nitratos debe ser superior a los 10 mg/l y en base a la "Directiva Marco del Agua" las concentraciones deben ser superiores a los 5 mg/l .

Por su parte al tener un coeficiente de variación inferior al 70%, significa que los resultados de las concentraciones de nitratos son heterogéneos; es decir, no existe mucha variabilidad entre los datos analizados en este período de tiempo.

En la figura 29 también se puede analizar que el valor mínimo promedio de las concentraciones de nitratos ocurre en el mes de noviembre con un valor de 0.08 *mg/l* y una desviación estándar de 0.02 *mg/l* que corresponden a una variabilidad del 23.33 %. El tener un $CV = 23.33 \%$ significa que los valores de las concentraciones monitoreadas en la quebrada Llaucay durante ese período de tiempo son datos poco variables u homogéneos; es decir, existe un grado de similitud entre dato y dato analizado.

El diagrama de caja correspondiente al mes de marzo indica un evento sumamente atípico a comparación con el resto de los meses analizados, con un valor máximo de 0.40 *mg/l*, teniendo una desviación estándar de 0.12 *mg/l* que corresponde a una variabilidad del 85.02 %. Evento atípico que a pesar de su alta concentración de nitratos, no representa contaminación dentro del cuerpo de agua en estudio. A demás, al tener un $CV = 85.02 \%$, indica que los resultados de las concentraciones de nitratos son valores muy heterogéneos.

Los valores máximos relevantes de concentración de nitratos suceden en los meses de: mayo con un valor de 0.24 *mg/l*, seguido de los meses de agosto y diciembre con un mismo valor de 0.16 *mg/l* y finalmente los meses de abril y julio temporada invernal en la microcuenca con un mismo valor de 0.15 *mg/l*.

Por otra parte, los valores mínimos relevantes de concentración de nitratos suceden en los meses de: mayo con un valor de 0.03 *mg/l*, seguido del mes de diciembre con un valor de 0.04 *mg/l* y finalmente los meses de febrero y abril con un mismo valor de 0.05 *mg/l*.

Quebrada Cóndor Yacu

Tabla 19 Valores estadísticos mensuales de concentración de nitratos (Q. Cóndor Yacu)

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
2010	0.05	0.04	0.11	0.03	0.12	0.11	0.1	0.089	0.009	0.02	0.1	0.4
2011	0.03	0.05	0.01	0.12	0.12	0.1	0.14	0.19	0.14	0.07	0.07	0.07
2012	0.25	0.06	0.12	0.13	0.18	0.19	0.11	0.28	0.28	0.31	0.14	0.09
2013	0.08	0.14	0.1	0.1	0.16	0.15	0.15	0.12	0.09	0.16	0.1	0.21
2014	0.1	0.1	0.06	0.081	0.12	0.12	0.17	0.23	0.16	0.16	0.09	0.12
2015	0.1	0.13	0.1	0.26	0.13	0.17	0.12	0.36	0.11	0.18	0.16	0.17
2016	0.23	0.09	0.17	0.17	0.26	0.4	0.18	0.05	0.05	0.11	0.1	0.1
	Coefficientes											
Máximo	0.25	0.14	0.17	0.26	0.26	0.40	0.18	0.36	0.28	0.31	0.16	0.40
Mínimo	0.03	0.04	0.01	0.03	0.12	0.10	0.10	0.05	0.01	0.02	0.07	0.07
Media	0.12	0.09	0.10	0.13	0.16	0.18	0.14	0.19	0.12	0.14	0.11	0.17
Mediana	0.10	0.09	0.10	0.12	0.13	0.15	0.14	0.19	0.11	0.16	0.10	0.12
Des.Estándar	0.09	0.04	0.05	0.07	0.05	0.10	0.03	0.11	0.09	0.09	0.03	0.11
Coe.Variación	71.69	44.80	52.19	57.24	33.13	58.46	21.82	58.65	72.91	64.13	28.35	68.88
Coe.Variación	71.69%	44.80%	52.19%	57.24%	33.13%	58.46%	21.82%	58.65%	72.91%	64.13%	28.35%	68.88%

Fuente: Elaboración propia

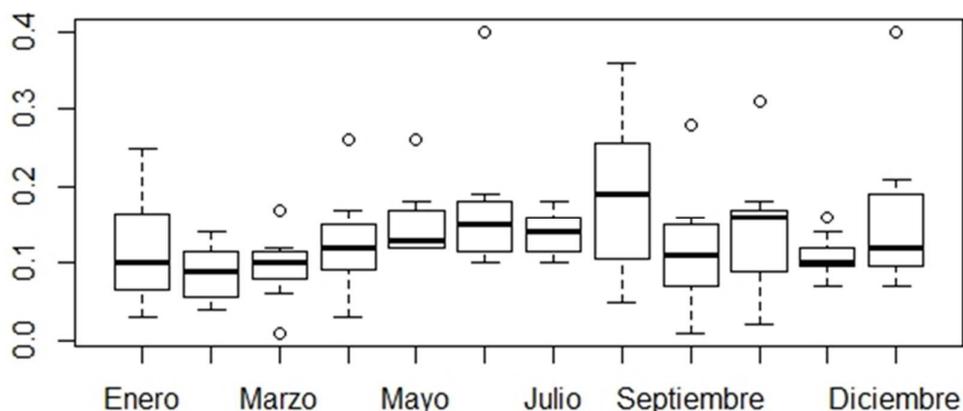


Figura 30. Promedios de las concentraciones de nitratos (Q. Cóndor Yacu)
Fuente: Elaboración propia

En la tabla 19 se representa el resumen estadístico mensual del comportamiento de las concentraciones de nitratos, monitoreadas en un período de seis años en la quebrada Cóndor Yacu perteneciente a la microcuenca del río Tabacay.

En la figura 30 se puede observar que el valor máximo promedio de las concentraciones de nitratos ocurre en el mes agosto con un valor de 0.19 mg/l y una desviación estándar de 0.11 mg/l que corresponde a una variabilidad del 58.65 %. Se deduce que el comportamiento de la variabilidad de las concentraciones de nitratos en este período de tiempo pueden estar en un rango de 0.30 a 0.19 mg/l de concentración, valores que no indican contaminación generada por la presencia de nitratos en el sistema acuático, pues de acuerdo al TULSMA para hablar de contaminación dentro de los sistemas acuáticos naturales la concentración de nitratos debe ser superior a los 10 mg/l y en base a la “Directiva Marco del Agua” las concentraciones deben ser superiores a los 5 mg/l .

Por su parte el tener un coeficiente de variación inferior al 70%, significa que los valores de las concentraciones de nitratos son heterogéneos; es decir, no existe mucha inestabilidad entre los datos analizados en este período de tiempo.

En la figura 30 también se puede analizar que el valor mínimo promedio de las concentraciones de nitratos ocurre en el mes de febrero con un valor de 0.09 mg/l y una desviación estándar de 0.04 mg/l que corresponden a una variabilidad del 44.08 %. Las concentraciones bajas de nitratos en este período de tiempo pueden deberse a que en los meses de febrero la microcuenca experimenta un temporal seco, donde las precipitaciones son escasas y los niveles de caudales tienden a descender. Al no existir arrastres considerables de fertilizantes ni de materia orgánica por acción de estos eventos naturales las concentraciones de nitratos también disminuyen en el cuerpo de agua, salvo el caso de

que exista derrames puntuales hacia los cursos de agua de la quebrada Cóndor Yacu que alteren las concentraciones de esta variable de calidad.

El diagrama de caja indica que existen dos eventos atípicos suscitados en los meses de junio y diciembre, con un mismo valor de 0.40 mg/l , dato que no representa contaminación generada por la presencia de nitratos en la quebrada Cóndor Yacu de acuerdo al TULSMA.

Los valores máximos relevantes de concentración de nitratos suceden en los meses de: agosto con un valor de 0.36 mg/l , seguido del mes de enero con un valor de 0.25 mg/l y finalmente el mes de diciembre con valor de 0.21 mg/l .

Por otra parte, los valores mínimos relevantes de concentración de nitratos suceden en los meses de: septiembre con un valor de 0.01 mg/l , seguido del mes de octubre con un valor de 0.02 mg/l y finalmente los meses de enero y abril con un mismo valor de 0.03 mg/l .

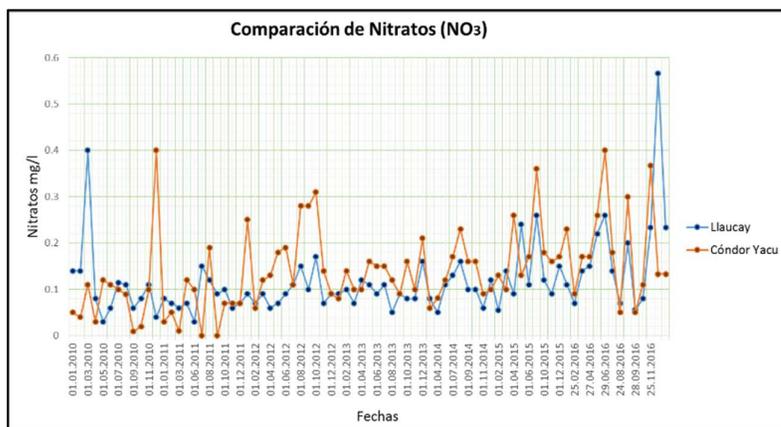


Figura 31. Concentración de nitratos para las quebradas Llaucay y Cóndor Yacu.
Fuente: Elaboración propia

En la figura 31 se puede observar las concentraciones de nitratos medidos por la EMAPAL en un período de tiempo que va desde enero del año 2010 hasta el mes de diciembre del año 2017. En ella se analiza que las concentraciones de esta variable de calidad son superiores en la quebrada Cóndor Yacu y que entre los valores analizados no existe mucha variabilidad siguiendo una misma tendencia de resultados. Además, se observa que los valores de las concentraciones de nitratos medidas en los sistemas hídricos son inferiores a los 0.6 mg/l , datos consolidados con los resultados de las muestras de agua tomadas en el trabajo de campo, donde se obtuvieron valores que varían entre los 0.10 a 0.50 mg/l .

En ningún punto de las quebradas Llaucay y Cóndor Yacu las concentraciones de nitratos en aguas superficiales son un problema para cualquier uso que se las quiera dar, pues los valores que se obtienen de los datos medidos no reflejan influencia antropogénica en las

quebradas en estudio, con valores por debajo de 0.6 mg/l . Los suelos de la microcuenca son claramente usados para la agricultura y ganadería extensiva, razón por la cual los valores de concentraciones de nitratos resultan inconvincentes.

La importancia de la caracterización y modelación de los parámetros anteriormente analizados es fundamental, debido a que pueden llegar a ser un problema importante en las aguas superficiales a medio y largo plazo. En cuanto a la medición de estos constituyentes existe un solo punto de monitoreo actualmente, generando “zonas de sombra” en las cuales no se está monitoreando, complicando la identificación de los focos contaminantes.

Una vez analizado los eventos puntuales que pudieron haberse suscitado en las quebradas de Llaucay y Cóndor Yacu, se puede decir en base a la salida técnica de campo que lo que verdaderamente ocurre es que existe gran arrastre de contaminantes hacia las quebradas por escorrentía en las épocas de invierno, vertidos directos de aguas residuales domésticas e industriales hacia los tributarios que alimentan las quebradas en estudio, actividad antropogénica que degrada la microcuenca como la siembra de pinos y la quema de pastizales.

La razón por la cual los análisis de las concentraciones de los contaminantes como amonio, nitritos, nitratos, demanda biológica de oxígeno, sólidos suspendidos son tan bajos, se debe a la dinámica hidrológica y morfología de las quebradas, factores que favorecen positivamente a la dilución rápida de los contaminantes.

Por último el análisis de los resultados de las variables de calidad medidos por la EMAPAL no resultan confiables pues no siguen una tendencia lógica de resultados, muestran inconcurrencia entre los valores calculados, no representa la realidad hidrológica de la microcuenca, no existe relación entre los indicadores hidrológicos y de calidad, el sistema de monitoreo hidrológico es deficiente y las series de datos históricos monitoreados son discontinuas. Motivos por el cual el estudio de los mismo resulta ineficiente tanto para comparar resultados como para suponer eventualidades que podrían haberse suscitado dentro de la microcuenca del río Tabacay.

4. Materiales y Métodos.

En este apartado se analiza y registra la información ofrecida por la Empresa de agua potable, alcantarillado y saneamiento ambiental del cantón Azogues “EMAPAL” y la Subsecretaría de Demarcación Hidrográfica de la Cuenca del río Santiago perteneciente a la Secretaría Nacional del Agua “SENAGUA”, con la finalidad de recopilar datos y series temporales que contribuirán a nuestro trabajo de modelación ambiental. Se analiza los datos de caudales, precipitaciones mensuales y de calidad que van hacer empleados en las

simulaciones, siendo necesario recalcar que solo se utilizaran datos acordes a las quebradas de Llaucay y Cóndor Yacu, pues son los cuerpos hídricos que presentan escenarios contrapuestos óptimos para la modelación, mientras la quebrada Llaucay presenta un escenario intervenido por las actividades antropogénicas, la quebrada Cóndor Yacu presenta un escenario protegido con poca intervención antropogénica. Además, son los dos cuerpos hídricos con los que se cuentan con la mayor disposición de datos históricos tanto de calidad como datos hidrológicos en los puntos cercanos a las captaciones donde se calibrará el modelo matemático.

4.1 Metodología de trabajo.

La metodología de trabajo que se utiliza en esta tesis de investigación sobre modelación ambiental partirá de acuerdo a los procedimientos estándares basados en la toma de muestras de agua en distintos puntos de las quebradas de Llaucay y Cóndor Yacu, observación de las condiciones ambientales que ayudará a interpretar mejor los resultados del modelo ambiental, análisis e interpretación de resultados de laboratorio de las variables de calidad a modelar, calibración del modelo ambiental ajustado a la dinámica hídrica de los sistemas acuáticos en estudio y por último la simulación de escenarios futuros frente a condiciones extremas de gestión de la microcuenca del río Tabacay. Todos estos puntos contribuirán al correcto funcionamiento del modelo matemático en cada una de sus etapas.

Al ser un sistema natural dinámico del cual se dispone poca información confiable es necesario tener en cuenta que los procedimientos y tiempos establecidos pueden cambiar, razón por la cual se desarrolla un diagrama de flujos de las actividades que contemplen posibles variaciones a lo planteado desde el inicio.

4.1.1 Diagrama de flujo para el desarrollo del modelo de calidad de agua para el río Tabacay.

Para el desarrollo de modelos de calidad como en cualquier proyecto se puede establecer acciones con tiempo y resultados esperados. Para el diseño del modelo ambiental de este trabajo de investigación se plantea el diagrama de flujo expuesto en la figura 32, el cual describe de manera sencilla los procesos que se siguen para el desarrollo final del modelo matemático perteneciente a las quebradas Llaucay y Cóndor Yacu.

Como primer paso se define el problema central en el cual se va a trabajar, su importancia, relevancia y que efecto tiene el mismo dentro de la sociedad, esto permite seleccionar un subsistema que analizar. Con el subsistema establecido se dirige a inspeccionar la cantidad y calidad de datos que se ostenta de ese subsistema, datos necesarios para una correcta simulación del modelo ambiental, si los datos que se tienen no

son los adecuados para las simulaciones volvemos a elegir un nuevo subsistema que posea los datos adecuados para poder diseñar un modelo robusto, sin complicaciones a futuro por la deficiencia de información.

Se diseña el modelo de gestión y calidad de agua a través de los módulos “SIMGES” y “GESCAL” respectivamente. Posteriormente se procede a la parte más complicada del modelo hidrológico que es calibrar y ajustar el modelo de calidad de agua realizando diferentes cálculos matemáticos, una vez comprobados e interpretados los datos obtenidos se procede a realizar simulaciones de alternativas futuras. El modelo hidrológico debe permitir, entre otras cosas, evaluar la evolución de la calidad en todo el sistema frente a distintos escenarios de distribución del recurso en la microcuenca, analizar el efecto sobre la calidad del sistema de futuras infraestructuras de depuración o captación y estimar caudales de dilución para la mejora ambiental en los puntos críticos de la microcuenca.

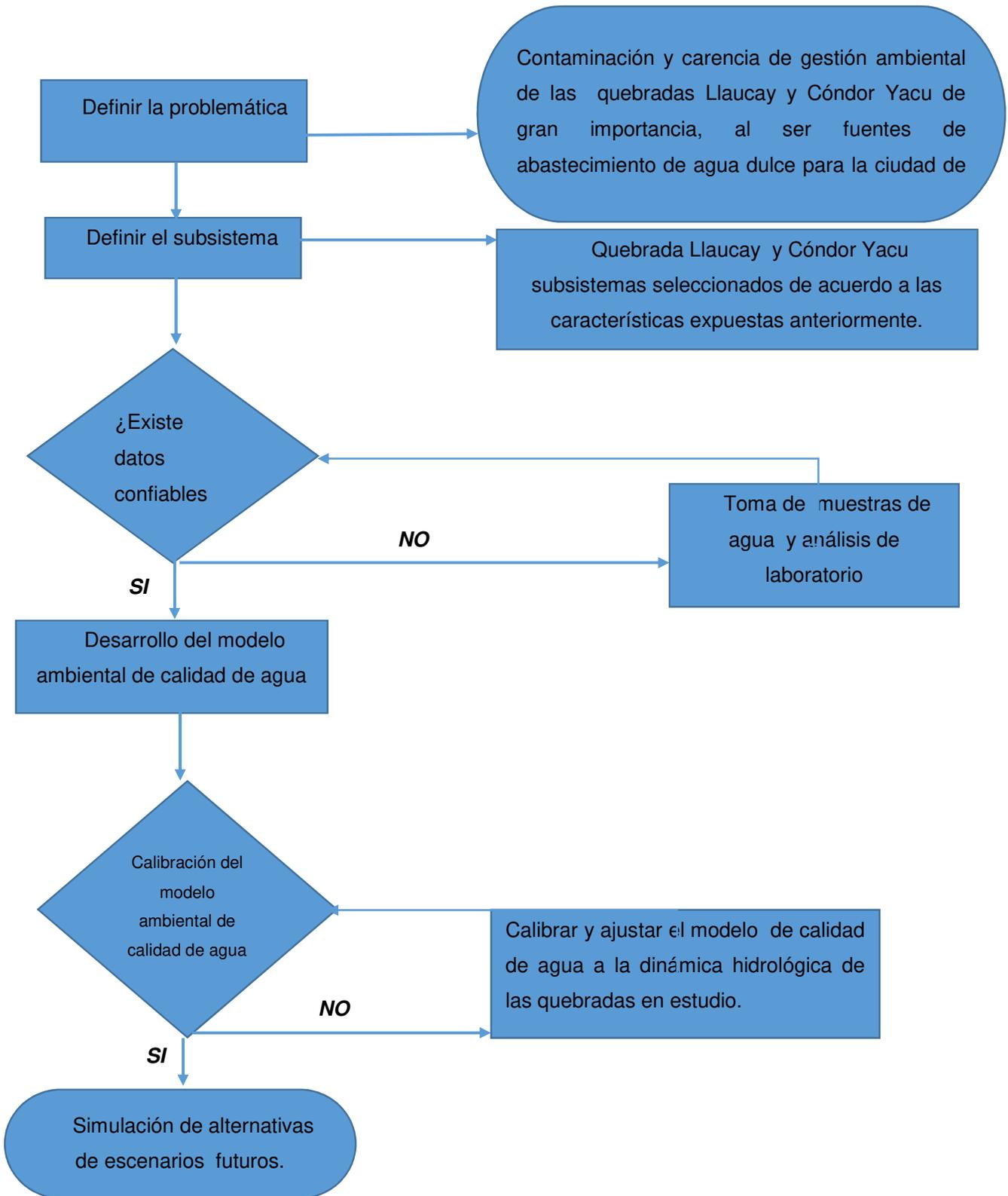


Figura 32. Diagrama de flujo seguido para el desarrollo del modelo de calidad de agua
Fuente: Elaboración propia

La definición del problema y la elección del subsistema se realizan teniendo en cuenta aspectos importantes como:

- Garantizar la calidad del recurso agua para el abastecimiento urbano y rural de la población azogueña.
- Garantizar el recurso agua para actividades productivas como la agricultura y la ganadería.
- Valor ecológico y social.
- Datos disponibles en cantidad y calidad.

Luego de haber establecido la problemática y los subsistemas que serán analizados, el trabajo consiste en la recopilación de datos disponibles necesarios para el desarrollo del modelo matemático.

- Teniendo los datos de caudales, precipitaciones y calidad necesarios se puede realizar el modelo con los parámetros de interés. Se analiza sólidos suspendidos, demanda biológica de oxígeno, oxígeno disuelto, nitrógeno orgánico, nitrógeno amoniacal, nitratos, potencial de hidrógeno y temperatura variables que intervienen en todas las reacciones físicas y químicas que ocurren dentro del sistema.
- Con los aforos se analiza el régimen de caudales necesarios para la dilución de los contaminantes. La variación temporal de los caudales depende del régimen hidrológico sumado a eso las actividades humanas que se dan dentro de la microcuenca del río Tabacay, cada uno de estos factores contribuyen a la variación de los volúmenes de los caudales. En este caso específico la disminución de los caudales se da por la canalización para el consumo de las poblaciones y las actividades que se desarrollan dentro de la microcuenca del río Tabacay como son la ganadería y agricultura pilares fundamentales de la economía del sector.

Para el trabajo de modelación ambiental se utilizó datos proporcionados por la Empresa Municipal de agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento ambiental del cantón Azogues “EMAPAL” entidad que posee datos de la red de calidad Nudpud y caudales tomados dentro de las quebradas de Llaucay y Cóndor Yacu; series mensuales consecutivas que van desde el mes de octubre del año 2009 hasta el mes de diciembre año 2016, a su vez también se utilizaron datos de la Subsecretaría de Demarcación Hidrográfica de la Cuenca del río Santiago perteneciente a la Secretaría Nacional del Agua “SENAGUA” entidad que suministro de datos informativos como concepciones de agua, datos de las estaciones pluviométricas Queseres, San Cristóbal y Surampalti que se encuentran dentro de la

micorcuenca del río Tabacay, series diarias consecutivas que van desde el mes de enero del año 2013 hasta el mes de marzo del año 2017, datos de información geográfica en formatos raster, shapfiles, mdt y ortofotos referentes a coberturas de uso de suelo, hidrología de la microcuenca del río Tabacay, actividades antropogénicas, delimitación de la microcuenca del río Tabacay, caminos y senderos, centros educativos, centros poblados, lagunas, quebradas, ríos y demás información que ayudaría a una correcta interpretación de las condiciones ambientales y actividades antropogénicas que tienen lugar dentro de la microcuenca del río Tabacay. Además, para respaldar y fortalecer la confiabilidad del modelo ambiental y de la información obtenida de las diferentes entidades públicas antes mencionadas como trabajo autónomo de campo se tomó datos de los caudales y muestras de aguas para análisis de laboratorio en distintos puntos de las quebradas anteriormente mencionadas, trabajo realizado en los meses de septiembre, noviembre, diciembre del año 2016 y febrero del año 2017.

Se realizó una valoración y depuración de los datos disponibles eliminando los valores en blanco y valores que no siguen una misma tendencia de los resultados de los caudales y parámetros de calidad, los mismos que no pueden ser utilizados para la calibración del modelo debido a su incoherencia con el resto de resultados.

No existe puntos de monitoreo en las quebradas aguas arriba, razón por la cual fue necesario establecer puntos de control y muestreo en la parte alta de las quebradas Llaucay y Cóndor Yacu antes de las captaciones para conocer el estado de sus aguas teniendo en cuenta la topografía e hidrología del terreno. Cabe recalcar que las quebradas principales son alimentadas por una red de tributarios con caudales pequeños pero que contienen vertidos directos de aguas residuales provenientes de actividades domésticas, agricultura y de ganadería, a su vez es necesario mencionar que existe aporte difuso de contaminación por escorrentía superficial proveniente de los usos del suelo, condiciones que dan a entender que la carga contaminante que presentan estos cuerpos hídricos es considerable a pesar de su alta reaeración.

En la figura 33 se muestran los puntos de captación de agua ubicados en las quebradas Llaucay y Cóndor Yacu, puntos donde la EMAPAL toma los datos de calidad y caudal, a su vez en la figura 34 se puede observar los puntos donde se midieron los caudales y se tomaron las muestras de agua en los meses de septiembre, noviembre, diciembre del año 2016 y febrero del año 2017. Estos puntos fueron etiquetados de tal manera que reconozca el software "AQUATOOL"; es decir, el punto más alto de las quebradas con el número tres, el punto medio con el número dos y el punto antes de la captación con el número uno.

Tabla 20. Coordenadas de las captaciones de agua

FID	X	Y	CAPTACIÓN	Altura m.s.n.m
0	741640	9704706	Cóndor Yacu	2924
4	743583	9702559	Llaucay	2877

Fuente: Elaboración propia

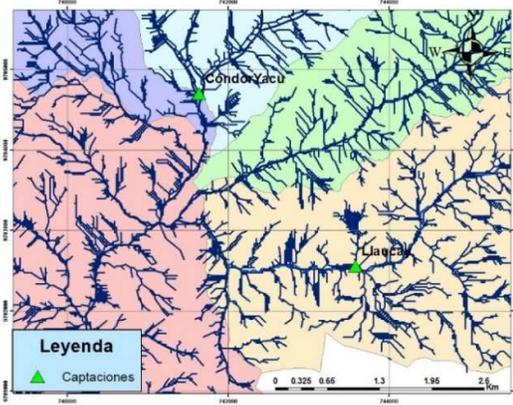


Figura 33. Captaciones de agua cruda dentro de las quebradas Llaucay y Cóndor Yacu
Fuente: Elaboración propia

Tabla 21. Coordenadas de las estaciones de monitoreo de calidad

FID	X	y	Descripción	Altura m.s.n.m	Zona
0	743610	9702547	Llaucay 1	2880	17M
1	743763	9702507	Llaucay 2	2896	17M
2	743980	9702149	Llaucay 3	2942	17M
3	741632	9704722	Cóndor 1	2924	17M
4	741618	9704759	Cóndor 2	2926	17M
5	741385	9705206	Cóndor 3	2995	17M

Fuente: elaboración propia

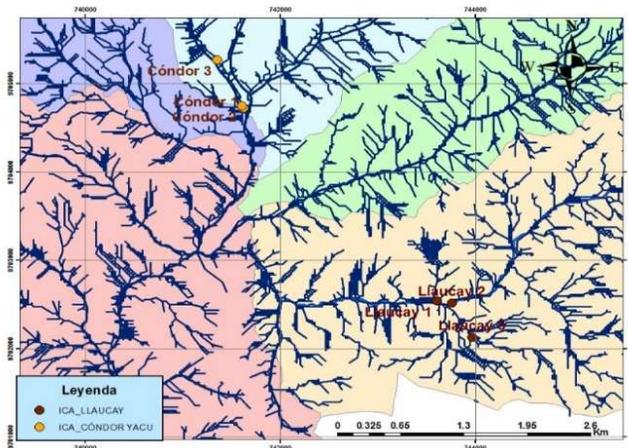


Figura 34. Estaciones de Monitoreo de calidad establecidas en el trabajo de campo
Fuente: Elaboración propia

4.2 Breve resumen sobre el Software Sistema Soporte de Decisión “AQUATOOL”.

El software que se utiliza para la modelación ambiental de la calidad de agua en las quebradas de Llaucay y Cóndor Yacu pertenecientes a la microcuenca del río Tabacay es el Sistema Soporte de Decisión “AQUATOOL” con su módulo “SIMGES” para la simulación de la gestión de recursos hídricos y el módulo “GESCAL” para la simulación de la calidad de agua en sistemas de recursos hídricos, desarrollados por el departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente de la Universidad Politécnica de Valencia.

El entorno de desarrollo o Sistema Soporte de Decisión “AQUATOOL” (en adelante “AQUATOOL”) es un software que sirve para la modelación de la gestión y la planificación de sistemas de recursos hídricos. El paquete denominado “AQUATOOL” incluye básicamente un módulo de optimización de cuencas, un módulo de simulación de cuencas, un módulo de simulación de acuíferos y un módulo de utilidades, los cuales trabajan conjuntamente para representar con mayor fidelidad posible los eventos que podrían ocurrir dentro de un sistema hídrico. El sistema no es específico para una cuenca determinada sino que está previsto para su uso general puesto que permite la representación de diferentes configuraciones de sistemas de recursos hidráulicos mediante el diseño gráfico y la entrada gráfica de datos, características que posibilitan la modelación correcta de la microcuenca siempre y cuando se cuente con un historial de datos verídicos y confiables.

En líneas generales “AQUATOOL” es una interface para la edición, simulación, revisión y análisis de modelos de simulación de la gestión de cuencas incluyendo la simulación de calidad de aguas.

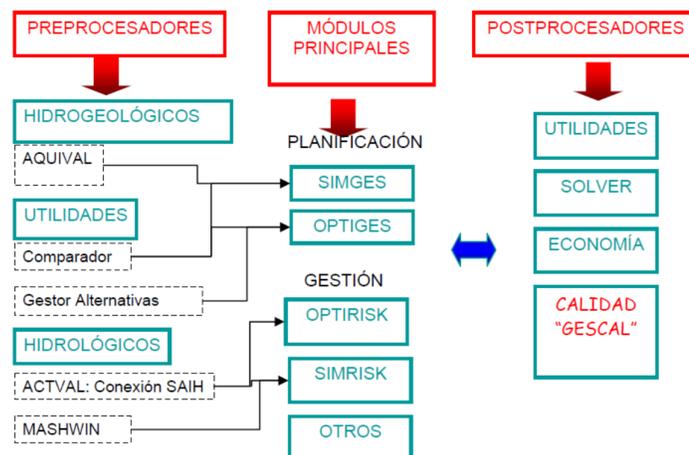


Figura 35. Componentes del Sistema de Soporte de Decisión “AQUATOOL”

Fuente: (Paredes, 2004)

Los módulos utilizados para diseñar el modelo matemático son el módulo “SIMGES” que es una herramienta de gestión de cuencas incluyendo utilización conjunta (Andreu et al.,

2007) y el módulo “GESCAL” que es una herramienta para la simulación de la calidad de aguas a escala de cuencas. (Paredes et. Al., 2007)

El módulo “SIMGES” es un modelo general para la Simulación de la Gestión de Cuencas o sistemas de recursos hidráulicos complejos en los que se dispone de elementos de regulación o almacenamiento tanto superficiales como subterráneos, de captación, de transporte, de utilización y/o consumo, y de depósitos de recarga superficial. (Andreu , Solera, Capilla, & Blanco, 2007)

El modelo admite cualquier configuración dentro de los límites impuestos únicamente por capacidades de hardware, lo que permite su utilización a nivel de cualquier sistema hídrico que se deseé gestionar y modelar.

El módulo “GESCAL” es una herramienta para la modelación de la calidad de agua a escala de cuencas cuyo objetivo es la planificación y gestión de recursos hídricos. Este módulo no intenta representar la evolución de la calidad de agua frente a eventos puntuales, sino por el contrario, reflejar la evolución espacio temporal de la calidad de agua en los sistemas hídricos modelados, fruto de las diferentes alternativas de gestión, depuración, contaminación y uso del recurso.

Aunque el programa permite, la modelación de la calidad de agua a escala de cuenca, es decir, sistemas hídricos completos no deja de ser eficaz su aplicación a pequeña escala como pueden ser tramos de ríos específicos o el análisis de un solo embalse. Esto se gracias a la completa consideración de procesos que se realiza en su formulación.

En fin al trabajar conjuntamente con los módulos “SIMGES” y “GESCAL” teniendo en cuenta la interacción entre las variables de calidad y las propiedades que analiza el programa dentro de los cuerpos hídricos, permiten el desarrollo de un modelo que integre por un lado la gestión de la microcuenca del río Tabacay y por otro lado la calidad de agua de la misma, cuyos resultados se reflejaran en la correcta calibración del modelo frente a los datos observados y la simulación de escenarios futuros.

4.3 Formulación del modelo.

Dentro del diseño del modelo ambiental de la microcuenca del río Tabacay se utilizará el módulo “GESCAL” que permite el desarrollo de modelos de calidad de agua sobre modelos de simulación de sistemas de recursos hídricos previamente desarrollados con el módulo “SIMGES”, módulos que forman parte del software “AQUATOOL” el cual permite la modelación de sistemas ambientales de recursos hidráulicos complejos.

Aunque la calidad de agua y la dinámica hídrica del recurso se considera en todas las posibles partes del modelo ambiental, la simulación de los procesos físico – químicos y biológicos que afectan la calidad se considera exclusivamente en los elementos de tramos de río (o canales) y embalses (o lagos). La característica fundamental, de este software, es la posibilidad de modelar tanto embalses como tramos de río en una misma aplicación y de una forma integrada con el resto de elementos del sistema. Así, de esta forma, la calidad en un tramo de río o en un embalse no sólo depende de los procesos que se producen sino también de la gestión del sistema y de la calidad de los diferentes elementos que tengan relación con el elemento en cuestión (Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, Valladolid-España). Los constituyentes que se pueden modelar son los siguientes:

- Temperatura.
- Contaminantes arbitrarios (Sólidos Suspendidos).
- Oxígeno disuelto y Materia Orgánica Carbonosa (MOC).
- Ciclo del nitrógeno (nitrógeno orgánico, amonio y nitratos) y su afección sobre el oxígeno disuelto.
- Eutrofización: ciclo del nitrógeno, fitoplancton (como clorofila-a, fósforo orgánico e inorgánico); y su afección sobre el oxígeno disuelto.

4.4 Tomas de muestras de agua.

La toma de muestras de agua y los aforos constituyen uno de los aspectos fundamentales de todo análisis de calidad de agua pues el muestreo es un proceso fundamental dentro del estudio de sistemas hídricos, ya que de nada serviría realizar determinaciones analíticas muy precisas si las muestras que llegan al laboratorio son manipuladas incorrectamente o no son representativas del cuerpo hídrico en estudio.

Las muestras de aguas analizadas fueron tomadas en tres puntos distintos de la quebrada Llaucay como de la quebrada Cóndor Yacu específicamente en los puntos establecidos de control y monitoreo antes mencionado. Para la toma de muestras se tuvo como referencia “La Norma Técnica Ecuatoriana: INEN 2 169: 98. Calidad de agua. Muestreo. Técnicas de muestreo”. La misma que hace referencia sobre las técnicas de muestreo usadas para obtener los datos necesarios en los análisis de control de calidad, de las aguas naturales, poluidas y aguas residuales para su caracterización.

De esta norma técnica se enfatizó en los siguientes ítems, los mismos que ayudarían al control adecuado en la toma y manipulación de las muestras de aguas:

- Que los recipientes donde se procederán a tomar las muestra deben ser de vidrio o polietileno, lavado con HCL 1N y agua destilada, y esterilizada en autoclave.
- Que el tiempo transcurrido entre el muestreo y el análisis ha de ser el mínimo posible. Un método general de conservación es mantener la muestra a 4 °C en la oscuridad.
- Que el recipiente debe proteger la composición de la muestra de pérdidas debidas a adsorción y volatilización, o de la contaminación por sustancias extrañas.
- Los recipientes de vidrio son recomendados para la determinación de compuestos químicos orgánicos y de especies biológicas, y los recipientes plásticos para la determinación de los parámetros físicos y químicos a analizar.
- El volumen de muestra recogida debe ser suficiente para los análisis requeridos, y para cualquier repetición del análisis.
- Reducir el tiempo de contacto entre la muestra y el muestreador y usar materiales que no permitan la contaminación en la muestra.
- Equipo de muestreo para análisis biológico, como en el caso del muestreo para los análisis físicos y químicos, algunas determinaciones deben ser ejecutadas "in situ" como el pH y la temperatura, sin embargo, la mayoría de muestras son trasladadas al laboratorio para su análisis.
- En el caso de muestreadores portátiles estos deben ser: herméticos, ligeros, fáciles de ser asegurados, resistentes a las inclemencias del ambiente y estar en condiciones de operar bajo un amplio rango de condiciones ambientales.
- El origen de las muestras, las condiciones bajo las cuales han sido recogidas deben ser anotadas y esta información ser adherida a la botella inmediatamente luego de ser llenada. Un análisis de agua es de valor limitado si no está acompañado por la identificación detallada de la muestra.

Los datos analíticos obtenidos mediante la determinación de parámetros como: sólidos suspendidos, demanda biológica de oxígeno, oxígeno disuelto, nitratos y parámetros tomados in-situ como la temperatura y el pH analizados en un tiempo y lugar específicos o a intervalos de tiempo y en un lugar en particular son necesarios para indicar la calidad de agua de los cuerpos de hídricos en estudio.

4.4.1 Formatos de Muestreo.

Antes de cada salida de campo fue necesario diseñar un formato de Muestreo el mismo que respaldaría cualquier duda acerca de la toma de muestra. El formato de muestreo de

acuerdo a “La Norma Técnica Ecuatoriana: INEN 2 169: 98. Calidad de agua. Muestreo. Técnicas de muestreo” constaba de:

- a) localización (y nombre) del sitio del muestreo, con coordenadas (lagos y ríos) y cualquier información relevante de la localización;
- b) detalles del punto de muestreo;
- c) fecha de la recolección;
- d) método de recolección;
- e) hora de la recolección;
- f) nombre del recolector;
- g) condiciones atmosféricas;
- h) datos recogidos en el campo.

Al tener en cuenta todos los ítems antes mencionados y seguir las normas técnicas de muestreo se justifica de alguna manera la veracidad de los resultados de los análisis de laboratorio.

5. Desarrollo del modelo de calidad de agua.

En este apartado se presenta el desarrollo del modelo de calidad de agua para las quebradas de Llaucay y Cóndor Yacu que forman parte de la microcuenca del río Tabacay, en base al siguiente orden.

- 1) Se completa los datos faltantes correspondientes a las series de precipitación monitoreadas por la estación meteorológica de Nudpud, mediante el método estadístico de regresión lineal.
- 2) Se estudia y maneja los programas hidrológicos de uso gratuito “TRASERO” y “EvalHid” complementos de software “AQUATOOL”, con el objetivo de tener una mayor comprensión de las características hidrológicas de la microcuenca del río Tabacay.
- 3) Con base en los datos hidrológicos y de calidad analizados estadísticamente en los apartados anteriores se diseña el modelo de calidad de agua.
- 4) Se calibra el modelo matemático comparando los valores simulados con los observados y se realiza un análisis de los resultados obtenidos con la ayuda del modelo de calidad de agua desarrollado.

- 5) Se realizan simulaciones de escenarios futuros, para determinar la eficiencia del modelo matemático.
- 6) Se proponen medidas de gestión y conservación del recurso hídrico de la microcuenca en base a los resultados del modelo matemático.

5.1 Trabajo Autónomo de campo.

5.1.1 Reconocimiento del área de estudio.

El trabajo autónomo de campo consta de cuatro salidas a las áreas de estudio, durante los meses de septiembre, noviembre, diciembre del 2016 y la última salida de campo en el mes de febrero del 2017. Siendo los objetivos de las salidas de campo el reconocimiento de la zona de estudio, establecimientos de puntos de control para la medición de caudales y la toma de muestras de agua para los respectivos análisis de laboratorio.

Durante las salidas de campo se evidencio el desgaste que sufría la microcuenca en las zonas de estudio, causada por la intensificación de las actividades humanas, principalmente la agricultura y la ganadería en zonas no aptas, la introducción de plantaciones extensivas de pino, factores que han generado una serie de impactos sociales así como ambientales, que están incidiendo negativamente en el equilibrio biótico y abiótico de la microcuenca y en las condiciones de vida de su población.

Uno de los impactos más característicos que degrada de forma progresiva la microcuenca del río Tabacay es de carácter antrópico, pues la utilización de los páramos para las actividades agrícolas y pecuarias han puesto en peligro las superficies de estos ecosistemas sumamente frágiles, ocasionando que la microcuenca pierda la capacidad de regular el flujo hídrico y se produzcan inundaciones en la parte baja de la microcuenca en épocas de invierno y sequías en épocas de estiaje.

En base a lo observado en el campo relacionado con las actividades antrópicas, se concluye que las actividades en la cuenca alta y media del río Tabacay afectan significativamente en la calidad y cantidad de agua que sirven de abastecimiento para la población azogueña tanto del área rural así como del área urbana; de hecho, actividades como la tala y quema de bosques, la ampliación de la frontera agrícola, las actividades pecuarias, las actividades industriales y la falta de gestión de las fuentes hídricas que posee la microcuenca del río Tabacay por parte de las autoridades, han dado lugar a que exista contaminación puntual y difusa que eventualmente llega a la captación de agua, y por ende, entra al sistema de abastecimiento.

A esto hay que añadir que las fuentes de agua dulce se ven afectadas también por la contaminación de origen natural, entrada al cuerpo hídrico de sedimentos, nutrientes y calor, que los elementos bióticos y abióticos de los sistemas acuáticos son capaces de soportar durante cierto período de tiempo; sin embargo, cuando el hombre descarga grandes cantidades de dichas sustancias en un período de tiempo relativamente corto, el sistema se vuelve incapaz de soportarlo: la biodiversidad se reduce; las fuentes naturales de alimento se deterioran y se originan costos de remediación elevados.

Motivo por el cual es de suma importancia conocer las características de la microcuenca, las actividades a las que se dedica la población, las demandas de agua, parámetros hidráulicos que rigen el almacenamiento y el movimiento de las aguas, zonas de abastecimiento y los medios por los cuales se abastecen, esto apoyado a herramientas técnicas como los modelos de simulación de flujo de aguas en cuencas hidrográficas permitirán llevar a cabo un análisis completo del estado en el que se encuentra la microcuenca del río Tabacay, para de esta manera ejecutar una gestión ambiental eficiente que proteja sobre todo las fuentes hídricas que posee esta microcuenca esencial para el abastecimiento de agua dulce para la población azogueña.



Figura 36. Quema de pastizales dentro de la microcuenca del río Tabacay

Fuente: Ilustración propia

5.1.2 Establecimiento de las estaciones de monitoreo y control.

Debido al deficiente monitoreo y control por parte de las autoridades encargadas del manejo y protección de la microcuenca del río Tabacay, las cuales establecen un solo punto de monitoreo antes de la captación, fue necesario implantar tres puntos diferentes de monitoreo y control tanto para la quebrada Llaucay como para la quebrada de Cóndor Yacu para tener un conocimiento más amplio de lo que en verdad sucede dentro de las quebradas en análisis. Los puntos de monitoreo y control iniciaban desde las captaciones hacia puntos más altos aguas arriba, cada punto fue etiquetado para la comprensión del estudio como

Llaucay 1 (Antes de la captación), Llaucay 2 (parte media de la quebrada), Llaucay 3 (parte alta de la quebrada) y para la quebrada Cóndor Yacu de la siguiente manera Cóndor 1 (Antes de la captación), Cóndor 2 (parte media de la quebrada) y Cóndor 3 (parte alta de la quebrada).

En cuanto a la ubicación de las estaciones de muestreo y control, no existe ningún método científico ni teórico para determinar los sitios donde se deben tomar las muestras de agua. Lo primero que debe tener en mente el investigador responsable de la selección de los sitios de muestreo es que las muestras deben ser representativas del cuerpo hídrico que se va a estudiar. La ubicación de una estación de muestreo depende de varios aspectos entre ellos la facilidad de acceso, el tipo de cuerpo de agua (corriente, alcantarillado, lago, mar), el presupuesto y principalmente los objetivos del programa de muestreo. (Alberto, 2011)

Los puntos de muestreo y control se tomaron en base a las características hídricas y morfológicas que presentan las quebradas, la influencia de actividades antropogénicas y lugares donde se evidencia que existe arrastre de contaminantes debido a la escorrentía superficial.

En los puntos de monitoreo y control ya establecidos se procedió a medir los caudales por medio del método del flotador, procedimiento que se basa en medir la velocidad del agua y aplicar la ecuación general, donde el caudal es igual a la sección por la velocidad. Para una estimación, la velocidad se calcula arrojando algún objeto que flote en el agua, y la sección se estima muy aproximadamente (anchura media x profundidad media). Este procedimiento da como resultado grandes errores, pero proporciona un orden de magnitud.

Para reducir el grado de error, los resultados de los caudales tomados en el campo se ingresaron a una plantilla de Excel la misma que para calcular los caudales totales consideraba características como la longitud del flotador, ancho del curso de agua, tiempo que toma al flotador trasladarse de un punto a otro (5 repeticiones), profundidades de las secciones donde se miden los caudales y el coeficiente de rugosidad.

A parte de medir los caudales en estos puntos de monitoreo y control también se tomaron muestras de aguas para sus respectivos análisis de laboratorio. Los resultados de los caudales como de los análisis de laboratorio respaldarían o contrastarían con los datos proporcionados por la EMAPAL, ofreciendo una prospección más amplia de estudio de las quebradas, a su vez al tener valores medidos en el campo ayuda a interpretar eventos atípicos que ocurrieron en las quebradas.

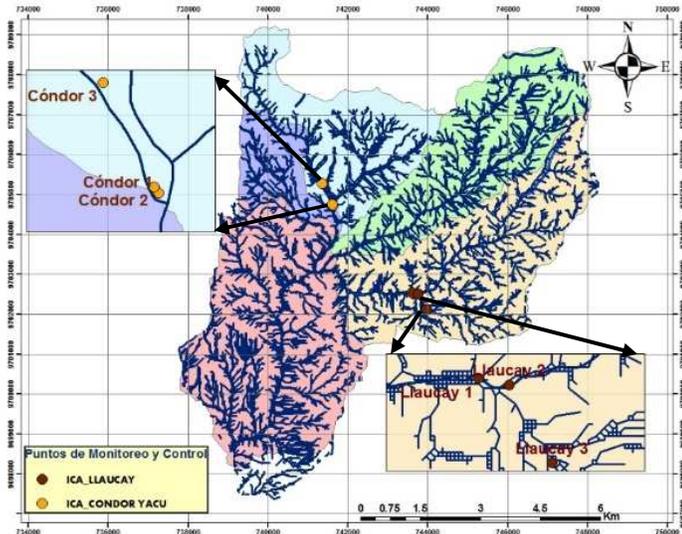


Figura 37. Puntos de monitoreo y control

Fuente: Elaboración propia

5.1.3 Análisis de resultados de laboratorio.

Una vez tomadas las muestras se procedió a realizar los análisis de laboratorio cuyos resultados darían una idea del estado en el que se encuentran las quebradas en estudio, y se confrontarían con los datos proporcionados por la EMAPAL para poder interpretar los eventos puntuales cuando las series de datos no siguen una tendencia lógica de resultados.

En el laboratorio se realizó el análisis de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5), sólidos suspendidos, oxígeno disuelto, nitratos y en el campo se midió el potencial de hidrógeno (pH) y la temperatura. Cuya importancia de medición de estas variables de calidad de agua se explica en el apartado “2.5 Contaminantes que intervienen en la modelación de la calidad de agua”.

Para el siguiente análisis de los resultados de laboratorio se etiquetaron los puntos de control y monitoreo de la siguiente forma ICA 1 corresponde a la parte baja de la quebrada antes de la captación, ICA 2 corresponde al punto medio de la quebrada y ICA 3 corresponde al punto más alto de la quebrada. (ICA: Índice de Calidad de Agua)

5.1.3.1 Resultados de los análisis de laboratorio de la quebrada Llaucay.

➤ **Sólidos Suspendidos**

Tabla 22. Valores de los Sólidos Suspendidos medidos en los ICAS (Q.Llaucay)

Llaucay					
Sólidos Suspendidos (SS)	Unidad	28/09/2016	25/11/2016	17/12/2016	17/02/2017
ICA_1	mg/l	50.50	18.00	16.00	18.00
ICA_2	mg/l	4.39	20.00	16.00	20.00
ICA_3	mg/l	16.10	26.00	16.00	16.00

Fuente: Elaboración propia

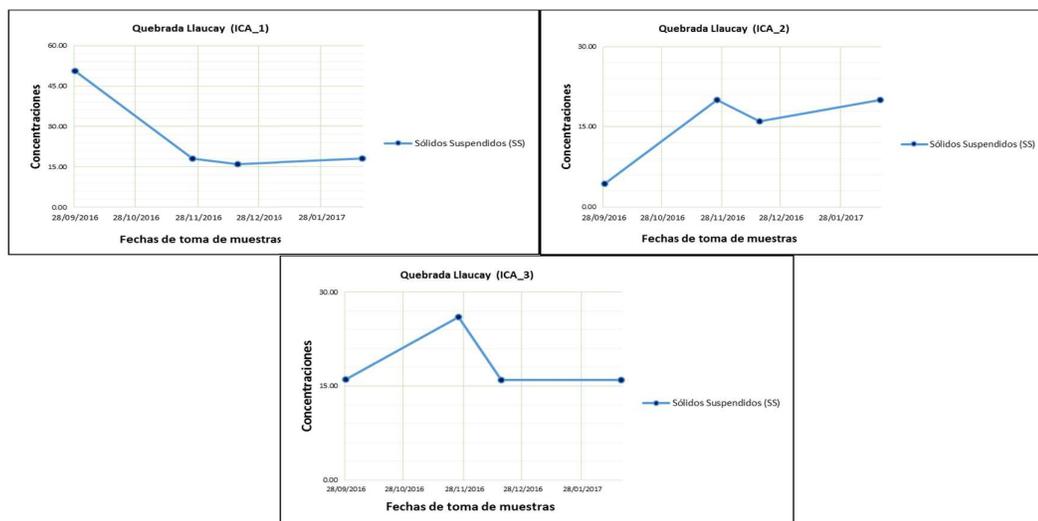


Figura 38. Análisis de Sólidos Suspendidos en los tramos de la quebrada Llaucay

Fuente: Elaboración propia

La presencia de sólidos en las muestras es un indicador de las sales disueltas en el agua, partículas en suspensión de carácter orgánico e inorgánico.

En la tabla 22 se muestran los resultados de los análisis de laboratorio de las concentraciones de sólidos suspendidos medidas en la quebrada Llaucay perteneciente a la microcuenca del río Tabacay, durante el trabajo autónomo de campo.

En la figura 38 se exponen los valores de las concentraciones de sólidos suspendidos para cada punto de monitoreo y control dentro de la quebrada Llaucay, analizados durante el trabajo autónomo de campo.

Una vez obtenido los valores de los sólidos suspendidos se puede observar que el estado de la quebrada Llaucay es óptimo en cuanto al parámetro de sólidos suspendidos, ya que según la “Directiva Marco del Agua” los límites permisibles para fuentes naturales son menores a 30 mg/l de concentración de sólidos suspendidos. Solo se puede observar un

evento atípico el 28/09/2010 en el ICA_1, es decir antes de las captaciones, este evento puede deberse a que al estar cerca del mes de octubre, que es uno de los meses en el que se registran precipitaciones máximas en la parte baja de la microcuenca, dando como resultado un arrastre considerable de contaminantes por escorrentía superficial hacia la parte baja de la quebrada.

➤ **Demanda Bioquímica de Oxígeno y Oxígeno Disuelto**

Tabla 23. Valores de la DBO₅ y Oxígeno Disuelto medidos en los ICAS (Q. Llaucay)

Llaucay					
Demanda Bioquímica de oxígeno (DBO ₅)	Unidad	28/09/2016	25/11/2016	17/12/2016	17/02/2017
ICA_1	mgO ₂ /l	1.00	5.00	5.00	10.00
ICA_2	mgO ₂ /l	1.00	5.00	6.00	10.00
ICA_3	mgO ₂ /l	10.00	4.00	5.00	13.00

Llaucay					
Oxígeno Disuelto (OD)	Unidad	28/09/2016	25/11/2016	17/12/2016	17/02/2017
ICA_1	mgO ₂ /l	16.20	10.88	13.56	7.45
ICA_2	mgO ₂ /l	15.4	10.78	9.95	7.98
ICA_3	mgO ₂ /l	15.1	7.57	7.35	7.3

Fuente: Elaboración propia NO₃

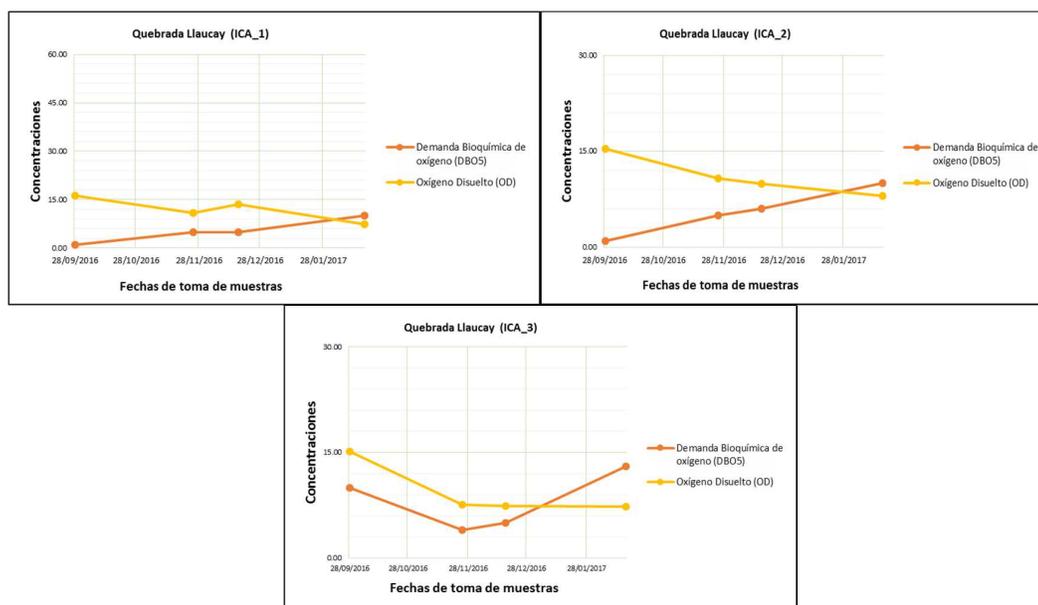


Figura 39. Análisis de la DBO₅ y del Oxígeno Disuelto en los tramos de la quebrada Llaucay
Fuente: Elaboración propia

Tradicionalmente se ha considerado el oxígeno disuelto como uno de los parámetros más importantes para evaluar la salud de un ecosistema. Una de las principales causas de consumo de oxígeno disuelto es la degradación de la materia orgánica, razón por la cual se analizan estos dos parámetros en forma conjunta.

En la tabla 23 se muestran los resultados de los análisis de laboratorio de las concentraciones de la DBO_5 y del oxígeno disuelto medidas en la quebrada Llaucay perteneciente a la microcuenca del río Tabacay, durante el trabajo autónomo de campo.

En la figura 39 se exponen los valores de las concentraciones de la DBO_5 y del oxígeno disuelto para cada punto de monitoreo y control dentro de la quebrada Llaucay, analizados durante el trabajo autónomo de campo.

De acuerdo a los resultados obtenidos en el laboratorio se puede decir que la cantidad de oxígeno disuelto en la quebrada Llaucay es óptima para la preservación de la flora y la fauna que viven en este ecosistema, pues según el "TULSMA" libro VI anexo 1 sobre los Criterios de Calidad admisibles para la preservación de la flora y fauna en aguas dulces, frías o cálidas, y en aguas marinas y de estuario. La cual establece que el límite máximo permisible debe ser no menor a $6\text{ mgO}_2/l$ y en cuanto a la DBO_5 que representa la cantidad de oxígeno que requieren las bacterias para degradar, estabilizar o neutralizar la materia orgánica en una muestra de agua se puede acotar que los resultados de los análisis no superan los límites permisibles referentes a la "Directiva Marco del Agua" para fuentes naturales que establece que la concentración de la DBO_5 debe ser menor a $10\text{ mgO}_2/l$.

Una vez analizado los resultados y comparados con la normativa nacional como es el "TULSMA" y una normativa internacional como es la "Directiva Marco del Agua" se puede asegurar en base a los estudios de campo que la calidad de agua en la quebrada Llaucay es buena debido a sus características hidrológicas que posee, y que por el momento las actividades antropogénicas no causan mayor impacto sobre este recurso, razón por la cual es un buen momento para diseñar un sistema de gestión ambiental que proteja y conserva las fuentes de agua que ostenta la microcuenca del río Tabacay, trabajo que debe ser consolidado con la ayuda de los diferentes actores sociales y políticos.

➤ **Nitratos**

Tabla 24. Valores de los Nitratos medidos en los ICAS (Q.Llaucay)

Llaucay					
Nitratos (NO ₃)	Unidad	28/09/2016	25/11/2016	17/12/2016	17/02/2017
ICA_1	mg/l	0.30	0.10	0.80	0.10
ICA_2	mg/l	0.10	0.50	0.40	0.30
ICA_3	mg/l	0A	0.10	0.50	0.30

Fuente: Elaboración propia

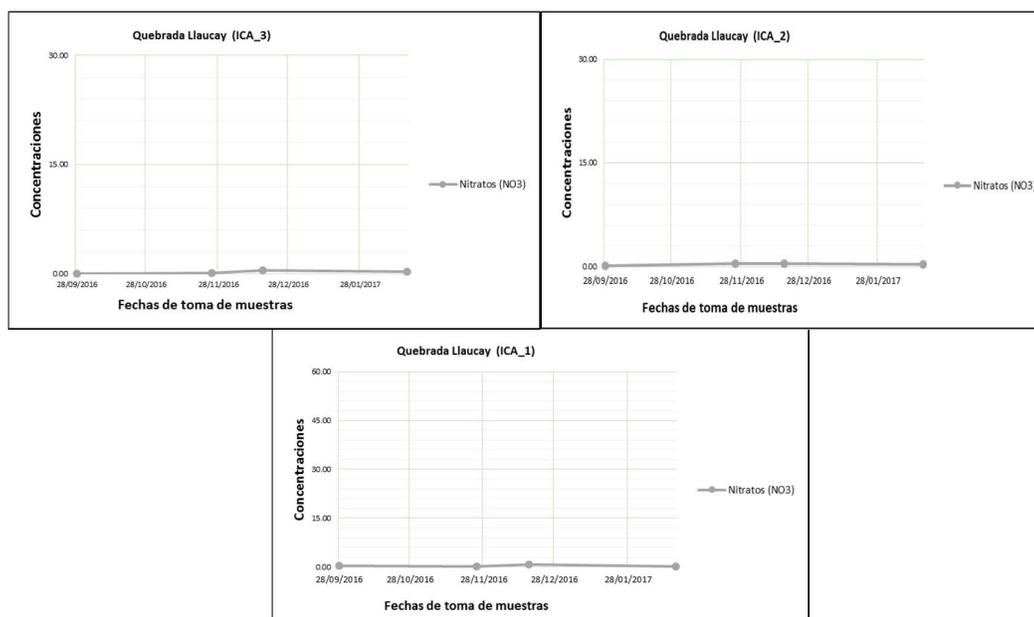


Figura 40 Análisis de Nitratos en los tramos de la quebrada Llaucay
Fuente: Elaboración propia

En la tabla 24 se muestran los resultados de los análisis de laboratorio de las concentraciones de nitratos medidas en la quebrada Llaucay perteneciente a la microcuenca del río Tabacay, durante el trabajo autónomo de campo.

En la figura 40 se exponen los valores de las concentraciones de nitratos para cada punto de monitoreo y control dentro de la quebrada Llaucay, analizados durante el trabajo autónomo de campo.

La presencia de nitratos en los sistemas naturales puede deberse a descargas directas de aguas de uso doméstico, de animales o la escorrentía que arrastra contaminantes hacia los cuerpos acuáticos. Para hablar de contaminación la presencia de nitratos debe ser mayor a 5 mg/l.

Los resultados de las concentraciones de nitratos obtenidas en los diferentes tramos de la quebrada Llaucay son inferiores a 5 mg/l , lo que da a entender que no existe contaminación por la presencia de esta sustancia, es más se puede afirmar que son aguas aptas para el consumo humano que solo requieren tratamiento convencional o de desinfección, ya que el límite máximo permisible es de 10 mg/l pertinente a la normativa ambiental ecuatoriana TULSMA libro VI anexo 1 “NORMA DE CALIDAD AMBIENTAL Y DE DESCARGA DE EFLUENTES : RECURSO AGUA”

➤ **Temperatura**

Tabla 25. Valores de las Temperaturas medidas en los ICAS (Q. Llaucay)

Llaucay					
Temperatura (T°)	Unidad	28/09/2016	25/11/2016	17/12/2016	17/02/2017
ICA_1	°C	11.00	12.00	12.00	11.70
ICA_2	°C	13.00	11.00	12.00	11.30
ICA_3	°C	13.00	11.00	11.00	11.00

Fuente: Elaboración propia

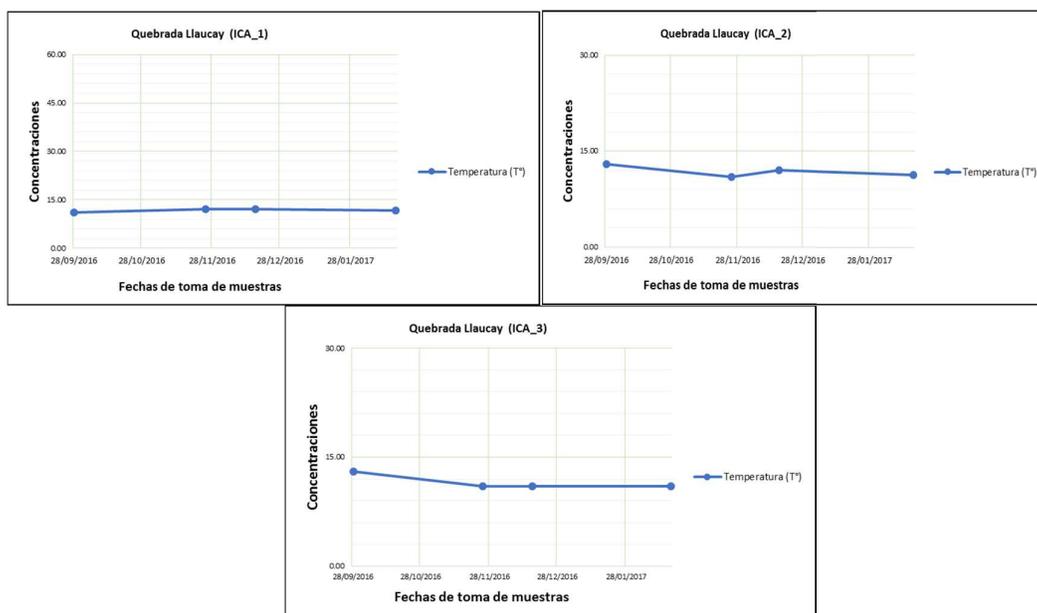


Figura 41. Análisis de la Temperatura en los tramos de la quebrada Llaucay
Fuente: Elaboración propia

En la tabla 25 se muestran los valores de las temperaturas medidas en la quebrada Llaucay perteneciente a la microcuenca del río Tabacay, durante el trabajo autónomo de campo.

En la figura 41 se exponen los valores de las temperaturas para cada punto de monitoreo y control dentro de la quebrada Llaucay, medidos durante el trabajo autónomo de campo.

En cuanto a la temperatura no se puede hablar de condiciones óptimas ya que la temperatura de los sistemas hídricos van a depender de gran medida de las condiciones ambientales que posee, solo se puede decir que la temperatura es un parámetro importante en los sistemas de tratamientos de aguas, ya que en ellos incluyen procesos químicos y biológicos que dependen de este parámetro, así como los fenómenos presentes en la autopurificación, la vida acuática y la adecuación del agua para fines benéficos.

La temperatura es esencial dentro los procesos físicos y químicos que ocurren dentro del cuerpo hídrico. En la quebrada Llaucay se puede observar que el valor de la temperatura del agua oscila entre los 11 y 13 °C manteniéndose estable mayoritariamente a los 11 °C, lo cual da a entender que si la temperatura es estable y esta influye en las reacciones fisicoquímicas y biológicas que ocurren dentro del sistema hídrico, los valores de las concentraciones de los compuestos que se generen con cada una de estas reacciones van hacer similares a lo largo del cuerpo hídrico analizado, pues no existen diferencias considerables entre los valores de temperatura estudiados en cada uno de los puntos de monitoreo y control.

➤ **Potencial de Hidrógeno**

Tabla 26. Valores del pH medidos en los ICAS (Q.Llaucay)

Llaucay					
Potencial de Hidrógeno (pH)	Unidad	28/09/2016	25/11/2016	17/12/2016	17/02/2017
ICA_1		8.10	8.08	8.04	7.70
ICA_2		7.96	8.02	8.00	7.50
ICA_3		7.93	7.90	8.00	7.20

Fuente: Elaboración propia

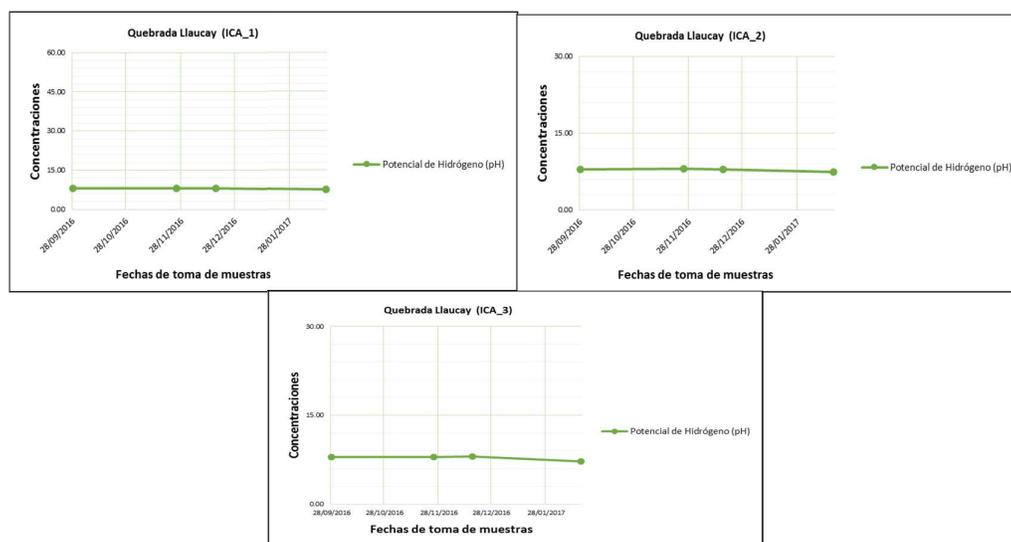


Figura 42. Análisis del pH en los tramos de la quebrada Llaucay

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 26 se muestran los valores del potencial de hidrógeno medidos en la quebrada Llaucay perteneciente a la microcuenca del río Tabacay, durante el trabajo autónomo de campo.

En la figura 42 se exponen los valores del potencial de hidrógeno para cada punto de monitoreo y control dentro de la quebrada Llaucay, medidos durante el trabajo autónomo de campo.

El rango de pH para la vida biológica es muy estrecho y crítico. El intervalo adecuado para la existencia de la vida biológica está entre 6 y 9 como manda la normativa ambiental nacional "TULSMA". El pH influye en los sistemas de tratamientos de agua como la coagulación y la desinfección. Y en los fenómenos que ocurren en el agua.

Observando los resultados de las mediciones del pH deducido en el campo se puede decir que los valores se encuentran dentro de los rangos permitidos para sistemas acuáticos y que siguen una misma tendencia de resultados al no existir mucha variabilidad entre ellos.

5.1.3.2 Resultados de los análisis de laboratorio de la quebrada Cóndor Yacu.

➤ Sólidos Suspendidos

Tabla 27. Valores de los Sólidos Suspendidos medidos en los ICAS (Q. Cóndor Yacu)

Cóndor Yacu					
Sólidos Suspendidos (SS)	Unidad	28/09/2016	25/11/2016	17/12/2016	17/02/2017
ICA_1	mg/l	0.00	10.00	8.00	10.00
ICA_2	mg/l	1.08	10.00	10.00	12.00
ICA_3	mg/l	1.02	8.00	6.00	12.00

Fuente: Elaboración propia

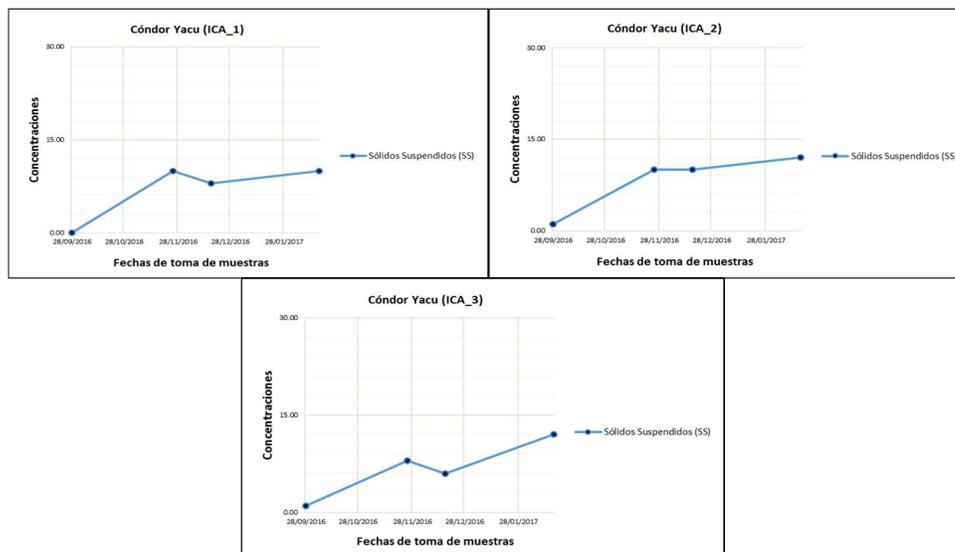


Figura 43. Análisis de los Sólidos Suspendidos en los tramos de la quebrada Cóndor Yacu

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 27 se muestran los resultados de los análisis de laboratorio de las concentraciones de sólidos suspendidos medidas en la quebrada Cóndor Yacu perteneciente a la microcuenca del río Tabacay, durante el trabajo autónomo de campo.

En la figura 43 se exponen los valores de las concentraciones de sólidos suspendidos para cada punto de monitoreo y control dentro de la quebrada Cóndor Yacu, analizados durante el trabajo autónomo de campo.

Los resultados de los Sólidos Suspendidos medidos en la quebrada Cóndor Yacu son inferiores a los resultados arrojados en la quebrada Llaucay, circunstancia que demuestra la intensidad antropogénica que experimenta cada una de las quebradas. A la vez se puede decir que la calidad de agua en las dos quebradas estudiadas es buena, pues este parámetro está relacionado directamente con la particularidad del recurso hídrico, la cual puede variar de acuerdo a la procedencia y al destino.

De acuerdo a la “Directiva Marco del Agua”, la cual establece un límite permisible menor a 30 mg/l para fuentes de aguas naturales sin actividad antropogénica, se puede decir que la quebrada Cóndor Yacu por el momento se encuentra en buenas condiciones, motivo por el cual es necesario establecer un sistema de gestión ambiental que proteja este recurso, pues en la actualidad el aumento progresivo de la población y la sobre explotación de los suelos por parte de las actividades ganaderas y agrícolas podrían a futuro cambiar la panorámica de esta situación.

➤ **Demanda Bioquímica de Oxígeno y Oxígeno Disuelto**

Tabla 28. Valores de la DBO₅ y del Oxígeno Disuelto medidos en los ICAS (Q. Cóndor Yacu)

Cóndor Yacu					
Demanda Bioquímica de oxígeno (DBO₅)	Unidad	28/09/2016	25/11/2016	17/12/2016	17/02/2017
ICA_1	mgO ₂ /l	1.00	3.00	3.00	4.00
ICA_2	mgO ₂ /l	1.00	3.00	3.00	4.00
ICA_3	mgO ₂ /l	1.00	4.00	4.00	6.00
Cóndor Yacu					
Oxígeno Disuelto (OD)	Unidad	28/09/2016	25/11/2016	17/12/2016	17/02/2017
ICA_1	mgO ₂ /l	14.80	7.35	7.82	7.99
ICA_2	mgO ₂ /l	15.90	7.54	8.06	8.02
ICA_3	mgO ₂ /l	15.67	7.51	8.12	8.01

Fuente: Elaboración propia

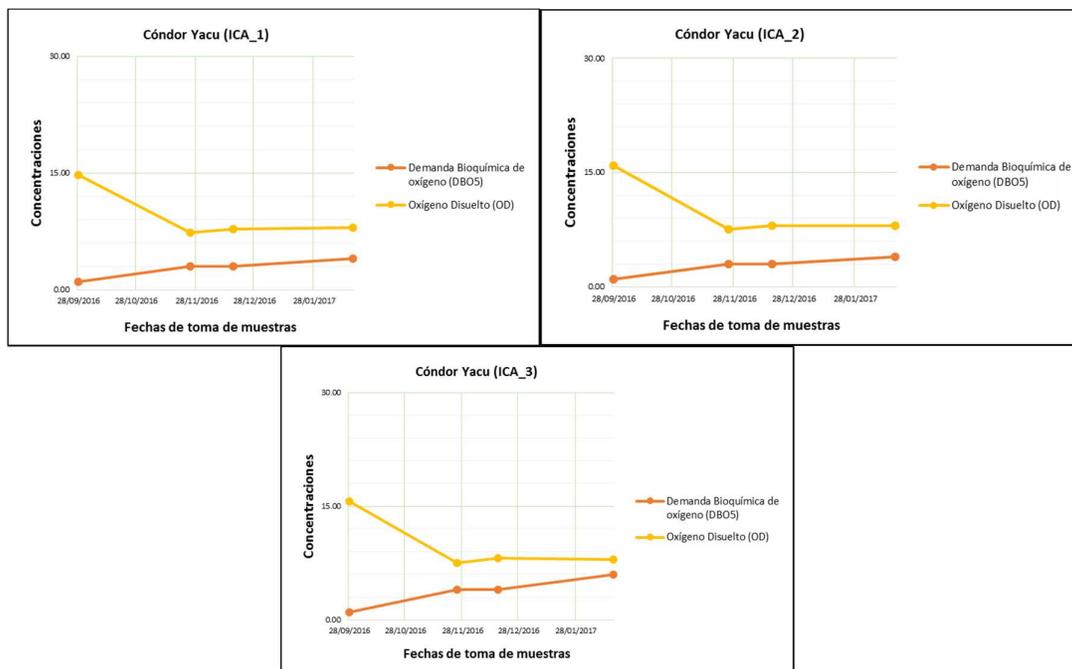


Figura 44. Análisis de la DBO₅ y del Oxígeno Disuelto en los tramos de la quebrada Cóndor Yacu
Fuente: Elaboración propia

En la tabla 28 se muestran los resultados de los análisis de laboratorio de las concentraciones de la DBO₅ y del oxígeno disuelto medidas en la quebrada Cóndor Yacu perteneciente a la microcuenca del río Tabacay, durante el trabajo autónomo de campo.

En la figura 44 se exponen los valores de las concentraciones de la DBO₅ y del oxígeno disuelto para cada punto de monitoreo y control dentro de la quebrada Cóndor Yacu, analizados durante el trabajo autónomo de campo.

La concentración de oxígeno disuelto en el agua representa el estado de salud en el que se encuentra el cuerpo hídrico, una de las principales causas de la disminución del oxígeno disuelto en los sistemas acuáticos se debe a la presencia de la materia orgánica, ya que las bacterias consumen oxígeno al momento de degradar la materia orgánica.

La materia orgánica se encuentra en los sistemas naturales como resultado de la escorrentía superficial procedente del lavado de los suelos y el metabolismo de los organismos acuáticos. Al ser los suelos de la quebrada Cóndor Yacu explotados en ganadería y agricultura y registrar altas precipitaciones durante algunos meses del año lo lógico sería que la cantidad de materia orgánica sea considerable, pero debido a las características hídricas que posee esta quebrada como es la reaireación, la cantidad de materia orgánica se degrada rápidamente y la concentración de oxígeno disuelto aumente progresivamente.

Analizados los resultados se llega a la conclusión de que la calidad de agua en la quebrada Cóndor Yacu es buena de acuerdo al “TULSMA” Libro VI anexo 1 referente a la preservación de la flora y fauna en sistemas naturales de agua dulce, la cual establece que el límite máximo permisible de oxígeno disuelto no debe ser menor a $6\text{ mgO}_2/\text{l}$ de concentración y en cuanto a la DBO_5 la cantidad de materia orgánica para sistemas de aguas naturales referente a la “Directiva Marco del Agua” la cual establece un límite permisible inferior a $10\text{ mgO}_2/\text{l}$.

➤ **Nitratos**

Tabla 29. Valores de los Nitratos medidos en los ICAS (Q. Cóndor Yacu)

Cóndor Yacu					
Nitratos (NO_3)	Unidad	28/09/2016	25/11/2016	17/12/2016	17/02/2017
ICA_1	mg/l	0.30	0.50	0.10	0.10
ICA_2	mg/l	0.30	0.30	0.10	0.10
ICA_3	mg/l	0.30	0.30	0.20	0.20

Fuente: Elaboración propia

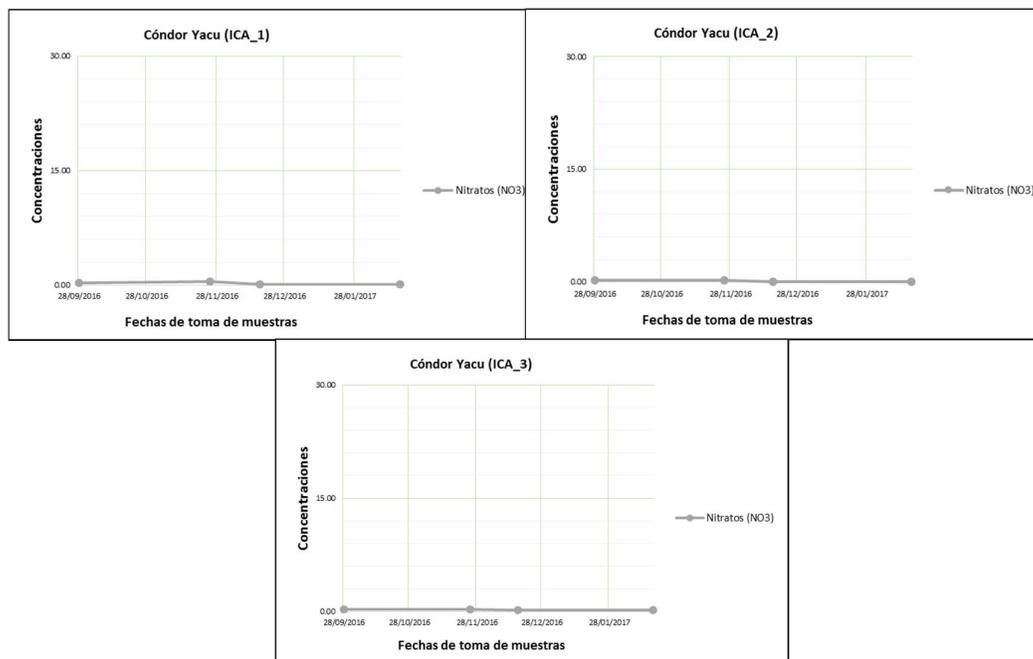


Figura 45. Análisis de los Nitratos en los tramos de la Quebrada Cóndor Yacu
Fuente: Elaboración propia

En la tabla 29 se muestran los resultados de los análisis de laboratorio de las concentraciones de nitratos medidas en la quebrada Llaucay perteneciente a la microcuenca del río Tabacay, durante el trabajo autónomo de campo.

En la figura 45 se exponen los valores de las concentraciones de nitratos para cada punto de monitoreo y control dentro de la quebrada Cóndor Yacu, analizados durante el trabajo autónomo de campo.

El nitrato es la forma más oxidada del nitrógeno pues posteriormente este se desnitrifica y regresa a la atmósfera como nitrógeno gas. Cuando existen actividades antrópicas, las aguas superficiales pueden tener concentraciones hasta 5 *mg/l* pero normalmente menores de 1 *mg/l*. Concentraciones por encima de los 5 *mg/l* usualmente indican contaminación, ya sea por desechos domésticos, de animales o la escorrentía.

De acuerdo a los resultados obtenidos en el laboratorio acerca de las concentraciones de nitratos tomados en los diferentes tramos de la quebrada Cóndor Yacu, se observa que no sobrepasan los 5 *mg/l*, es decir que las concentraciones están muy por debajo para hablar de contaminación generada por la presencia de esta sustancia en fuentes de agua naturales tomando como base la “Directiva Marco del Agua”. Por su parte la normativa ambiental nacional “TULSMA” Libro VI anexo 1 concernientes a aguas de consumo humano y uso doméstico que únicamente requieran desinfección o tratamiento convencional” el límite permisible es de 10 *mg/l*.

En general la presencia de nitratos en la quebrada Cóndor Yacu es casi nula como lo indican la figura 45, a pesar de que es un cuerpo hídrico abordado por las actividades ganaderas y agrícolas que afectan directamente las concentraciones de esta variable de calidad al ingresar en los cursos de agua.

➤ Temperatura

Tabla 30. Valores de la Temperatura medidos en los ICAS (Q. Cóndor Yacu)

Cóndor Yacu					
Temperatura (T°)	Unidad	28/09/2016	25/11/2016	17/12/2016	17/02/2017
ICA_1	°C	8.20	10.00	10.00	9.70
ICA_2	°C	9.00	10.00	10.00	9.60
ICA_3	°C	9.00	9.00	9.00	9.40

Fuente: Elaboración propia

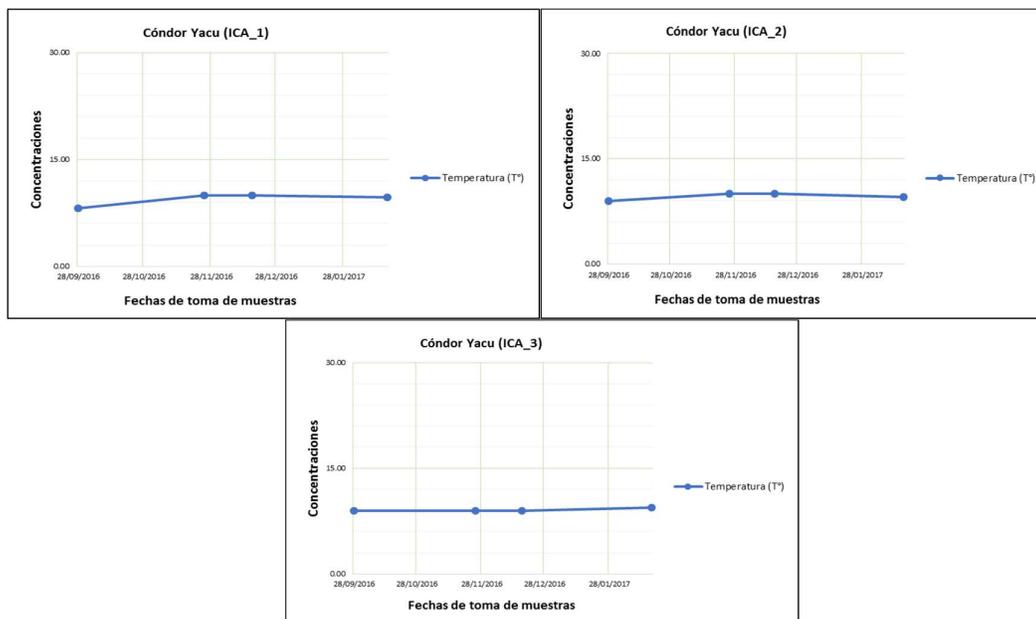


Figura 46. Análisis de la Temperatura en los tramos de la quebrada Córdor Yacu
Fuente: Elaboración propia

En la tabla 30 se muestran los valores de las temperaturas medidas en la quebrada Córdor Yacu perteneciente a la microcuenca del río Tabacay, durante el trabajo autónomo de campo.

En la figura 46 se exponen los valores de las temperaturas para cada punto de monitoreo y control dentro de la quebrada Córdor Yacu, medidos durante el trabajo autónomo de campo.

Conocer el valor de la temperatura es esencial en el tratamiento de aguas tanto crudas como residuales, ya que en base a este parámetro se dan todos los procesos físicos y químicos que ocurren dentro del cuerpo hídrico. Es uno de los parámetros físicos más importantes en el agua, pues por lo general influye en el retardo o la aceleración de la actividad biológica, la absorción de oxígeno y la precipitación de compuestos, la formación de depósitos, la desinfección y los procesos de mezcla, floculación, sedimentación y filtración.

En este punto no se puede establecer condiciones óptimas o límites permisibles para la temperatura, ya que este parámetro depende en gran medida de las condiciones ambientales a las que este expuesto el sistema hídrico.

Se puede observar que la temperatura del agua dentro de la quebrada Córdor Yacu varía entre los 8 y 10 °C, manteniéndose constante mayoritariamente a los 9°C a lo largo del cuerpo hídrico analizado, lo que necesariamente da a entender que las concentraciones de

los compuestos que se generan con cada una de las interacciones fisicoquímicas y biológicas en las que influye el factor de la temperatura van hacer similares en cada uno de los puntos de monitoreo y control.

Múltiples factores, principalmente ambientales, pueden hacer que la temperatura del agua varíe continuamente

➤ **Potencial de Hidrógeno**

Tabla 31. Valores del pH medidos en los ICAS (Q. Cóndor Yacu)

Cóndor Yacu					
Potencial de Hidrógeno (pH)	Unidad	28/09/2016	25/11/2016	17/12/2016	17/02/2017
ICA_1		8.28	8.16	8.06	7.50
ICA_2		8.27	8.28	7.96	7.30
ICA_3		8.28	8.25	8.02	7.20

Fuente: Elaboración propia

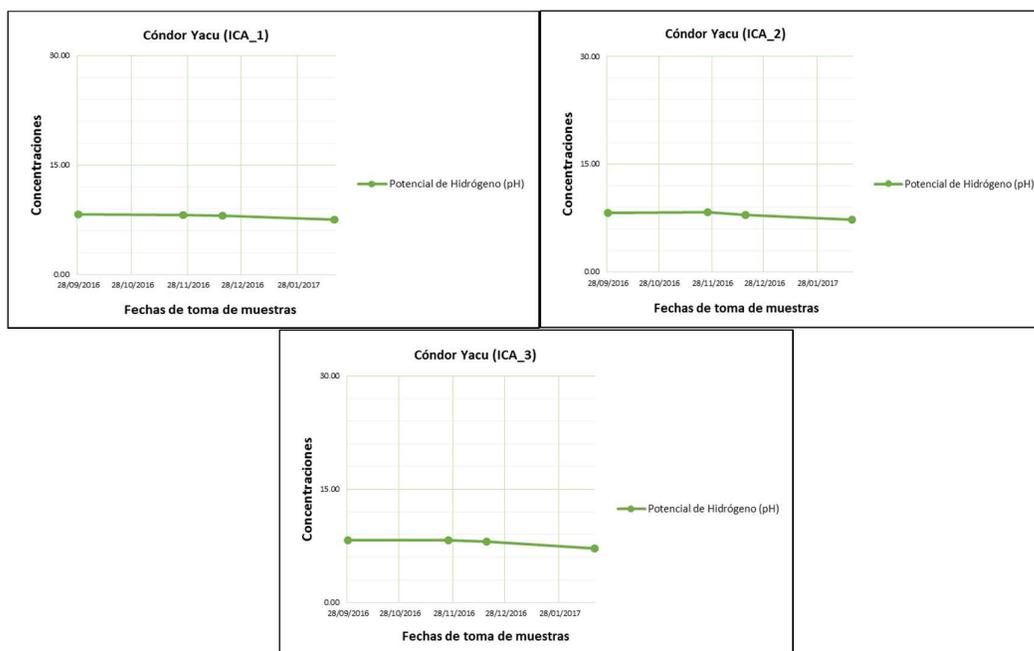


Figura 47. Análisis del pH en los tramos de la quebrada Cóndor Yacu

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 31 se muestran los valores del potencial de hidrógeno medidos en la quebrada Cóndor Yacu perteneciente a la microcuenca del río Tabacay, durante el trabajo autónomo de campo.

En la figura 47 se exponen los valores del potencial de hidrógeno para cada punto de monitoreo y control dentro de la quebrada Cóndor Yacu, medidos durante el trabajo autónomo de campo.

El pH influye en algunos fenómenos que ocurren en el agua, como la corrosión y las incrustaciones en las redes de distribución.

Aunque podría decirse que no tiene efectos directos sobre la salud, si puede influir sobre los procesos de tratamiento del agua, como la coagulación y la desinfección.

Por lo general las aguas en estado natural (no contaminadas) exhiben un pH en el rango de 6 a 9, rango que también lo establece la legislación ambiental ecuatoriana tanto para aguas de consumo humano y uso doméstico como para aguas aptas para la preservación de la flora y la fauna de los sistemas acuáticos. De acuerdo a los resultados de pH medidos en el campo podemos decir que los resultados se encuentran dentro de los rangos para sistemas hídricos naturales y que no existen variaciones considerables entre dato y dato a pesar de haber sido tomados en diferentes períodos de tiempo.

Una vez realizado el análisis de los resultados obtenidos de las concentraciones de Nitratos (NO_3), Oxígeno Disuelto, Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5), Sólidos Suspendidos (S.S) y datos de campo como la Temperatura y el Potencial de Hidrógeno (pH) tomados en distintos tramos de las quebradas Llaucay y Cóndor Yacu pertenecientes a la microcuenca del río Tabacay y analizados en base a la normativa ambiental nacional como es el "TULSMA" y una normativa internacional como es la "Directiva Marco del Agua", se puede decir que el estado de las quebradas en estudio es óptimo debido a la gran dinámica hídrica que posee, y que hasta la actualidad las actividades antropogénicas como la ganadería y la agricultura no están causando mayor impacto ambiental, motivo por el cual el modelo matemático de calidad de agua a desarrollar estará enfocado a contribuir en la correcta gestión ambiental de protección y preservación de las fuentes hídricas que posee este ecosistema. Simulando escenarios a futuro donde se controle las descargas directas hacia las quebradas Llaucay y Cóndor Yacu.

5.2 Análisis y recopilación de datos

Se procede a recopilar datos históricos sobre las precipitaciones, caudales y las temperaturas ambiente registradas dentro de la microcuenca del río Tabacay para posteriormente analizarlas e utilizarlas para determinar características hidrológicas de la microcuenca, los mismos que contribuirían al desarrollo del modelo matemático. Los únicos datos con los que se cuentan pertenecen a los medidos por la EMAPAL en la estación

meteorológica de Nudpud ubicada dentro de la microcuenca, cuyas coordenadas UTM son en X: 746459 y en Y: 9705417 a una altura de 3230 m.s.n.m.

Los datos monitoreados por la EMAPAL en la estación meteorológica de Nudpud presentan series tiempo que inician en el mes de octubre del año 2010 hasta el mes de diciembre del año 2016, serie que registran datos de variables climáticas como temperaturas, precipitaciones, humedad relativa, punto de rocío entre otros parámetros necesarios para conocer las características hidrológicas y climáticas de la microcuenca. Estas series históricas mensuales presentan errores en los datos medidos, pues existen datos registrados en cero como es en el caso de las precipitaciones que van desde el mes de diciembre del 2014 hasta febrero del año 2015, meses que según el Plan de Manejo Integral de la microcuenca del río Tabacay se registran precipitaciones en la parte baja de la microcuenca, a su vez presenta vacíos o datos faltantes en los meses de marzo y abril del año 2013. Debido a la falta de datos confiables se buscó más información sobre estaciones meteorológicas que estuviesen cerca o dentro de la microcuenca del río Tabacay.

Para la deducción de los datos anuales faltantes en los registros hidrológicos proporcionados por la EMAPAL, se buscó información de otras estaciones meteorológicas que se encuentren cerca de la microcuenca y a su vez no exista mucha diferencia de alturas con la estación meteorológica de Nudpud para de esta manera proceder al llenado de datos por medio del método estadístico de “regresión lineal”.

Se obtuvo información por parte de la Secretaría Nacional del Agua jurisdicción Subsecretaría de la Demarcación Hidrográfica Santiago de ahora en adelante “SENAGUA”, información que contenía datos pluviométricos monitoreados por las estaciones meteorológicas de San Cristóbal, Surampalti y Queseras, que se encuentra dentro de la microcuenca del río Tabacay como se muestra en la figura 48.

Tabla 32. Información de las Estaciones Meteorológicas

X	Y	Estación	Ubicación	Tipo	Estado	Cota
746459	9705417	Nudpud	Tabacay	Estación Meteorológica	Funcionando	3230
741161	9703086	San Cristobal	Azogues	Estación Meteorológica	Funcionando	2919
739279	9699879	Surampalti	Azogues	Estación Meteorológica	Funcionando	3289
741649	9704709	Queseras	Azogues	Estación Meteorológica	Funcionando	3333

Fuente: Elaboración propia

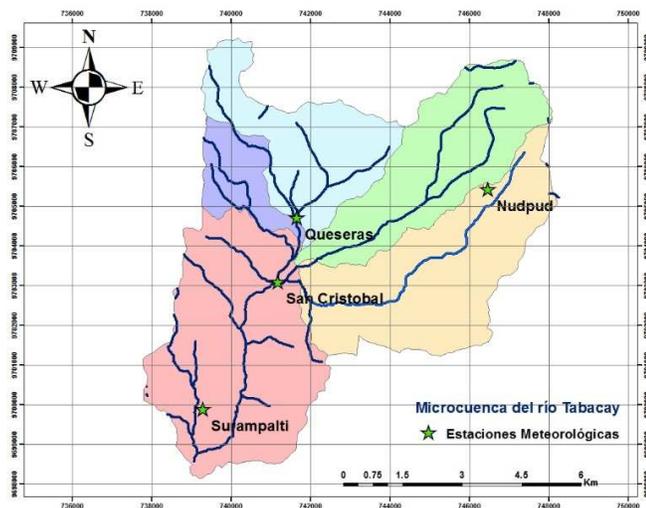


Figura 48. Estaciones meteorológicas dentro de la microcuenca del río Tabacay
Fuente: Elaboración propia

Una vez analizados los datos proporcionados por “SENAGUA” se procedió al llenado de datos faltantes por medio del método estadístico de “*regresión lineal*” comparando las estaciones meteorológicas de Nudpud y Surampalti por ser estaciones que se encuentran a similares alturas, ya que al existir una diferencia considerable de cotas podría dar resultados erróneos al momento de calcular datos de precipitación que no representen la realidad de la microcuenca.

Los datos proporcionados por “SENAGUA”, son series históricas diarias con una data que va desde 26 de enero del año 2013 hasta el 12 de marzo del año 2017, series históricas de precipitaciones y temperaturas que ayudarían a tener datos confiables para el análisis hidrológico de la microcuenca del río Tabacay.

5.2.1. **Fundamentación teórica.**

La deducción de los datos anuales faltantes en los registros hidrológicos, es necesaria para integrar series con un periodo común, las cuales son requeridas en los estudios de simulación de los sistemas hidráulicos, y en varios métodos regionales de estimación de crecientes. A demás, las estimaciones estadísticas se vuelven más confiables y exactas conforme proceden de series completas más simples. El método de “*regresión lineal*” permite estimar datos anuales faltantes con base en los registros cercanos que tiene dependencia o correlación con la serie incompleta.

El método estadístico de “*regresión lineal*” se basa en el algoritmo de Beale-Little, el mismo que considera cada registro como variable dependiente y el resto como variables independientes, empleando toda la información disponible y no únicamente el periodo común de datos, con el propósito de conducir a la estimación de valores faltantes en los registros procesados.

Una aplicación práctica del análisis multivariado consiste en estimar datos hidrológicos faltantes, tanto de escurrimiento como de lluvia o de gasto máximo; los cuales no existen debido a fallas o pérdida del equipo de muestreo, enfermedad o abandono por parte de los operadores o simplemente por inicio retrasado de la operación de la estación hidrométrica o pluviométrica. Los dos objetivos básicos de la estimación de datos faltantes son: 1) completar las series disponibles para poder realizar análisis hidrológicos del tipo de período común y 2) mejorar la calidad estadísticas de los parámetros analizados, al emplear series completas y más largas. (Francisco, 2015)

Los modelos de regresión se usan para estimar “la mejor” relación funcional entre una variable dependiente y una o varias variables independientes, mientras que los métodos de correlación se utilizan para medir el grado de asociación de las distintas variables.

El método de “regresión lineal” se recomienda para la estimación de datos mensuales y anuales de la estación en estudio, en base a datos pluviométricos consistentes de una estación cercana, siempre y cuando esta estación presente datos confiables.

5.2.2 Metodología de llenado de datos faltantes.

Método de Regresión Lineal

Este método es uno de los más utilizados; se recomienda para la estimación de los datos mensuales y anuales de la estación en estudio comparando con una estación pluviométrica cercana, que cuente con una estadística consistente y observada. Para ello se requiere establecer una regresión y correlación lineal entre una estación patrón y una estación que tenga carencia de información mediante la ecuación lineal de dos variables, del tipo:

$$Y = a + b * x$$

$$a = \hat{Y} - \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x^2} . \bar{x} \qquad b = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x^2}$$

Ecuación 6. Regresión Lineal

(6)

Fuente: (Francisco, 2015)

Donde;

Y= Valor estimado de la precipitación para la estación carente (mm).

X= valor de la precipitación registrado en la estación patrón (mm).

a, b= constantes de regresión. (b= pendiente de la regresión lineal).

\bar{x} : Promedio de los datos en “x”

\hat{Y} : Promedio de los datos en “y”

σ_x^2 : Valor de la varianza en “x”

σ_{xy} : Valor de la covarianza en “x” y en “y”

Este método, aya pesar de ser de muy fácil aplicación, no puede ser usado indiscriminadamente, dado que es necesario saber si la calidad del ajuste es buena o mala. Una mala calidad de ajuste, puede llevar a la generación de información sin consistencia, lo cual en el lugar de mejorar la situación la empeora por la agregación estadística de datos no representativos de la realidad que se pretende estimar.

La calidad del ajuste depende de la relación entre las variables. Si dos variables no covarían, no se puede hacer predicciones válidas, y si la intensidad de la covariación es moderada, las predicciones no serán demasiado buenas. En consecuencia, hay que disponer de alguna medida de la capacidad de la ecuación de Regresión para obtener predicciones buenas (en el sentido de que sean lo menos erróneas posibles).

Esta medida es el “*Coefficiente de Determinación R^2* ”, que es el cuadrado del coeficiente de correlación de Pearson, y da la proporción de la variación de la variable Y que es explicada por la variable X (variable predictora o explicativa). Si la proporción es igual a cero, significa que la variable predictora tienen nula capacidad predictiva de la variable a predecir (Y). Cuando mayor sea la proporción, mejor será la predicción. Si llegara a ser igual a uno la variable predictora explicaría toda la variable de Y, y las predicciones no tendrían error.

Desarrollo del trabajo

Para el llenado de los datos faltantes y datos registrados en cero en la estación de Nudpud se utilizó la serie de datos registrados por la estación Surampalti, por ser la estación meteorológica que se encuentra a una altura muy próxima a la estación meteorológica de Nudpud y presentar un coeficiente de correlación propicio para llevar a cabo el cálculo de datos faltantes. La serie patrón será la serie histórica de Surampalti la misma que se tuvo que promediar en meses para realizar su análisis y la serie observada o que tiene deficiencia de datos será la serie histórica registrada por la estación Nudpud.

El análisis y llenado de los datos solo se realizara desde el mes de enero del año 2013 hasta el mes de diciembre del año 2016, debido a que solo se cuenta con series completas en este período de tiempo en la estación meteorológica Surampalti.

Como primer punto es necesario saber si existe correlación entre la serie patrón Surampalti y la serie observada Nudpud, para lo cual sacamos el coeficiente de correlación,

el mismo que debe ser mayor a 0,7. Si el resultado de correlación es menor a 0,7 entre las series no se puede aplicar este método de llenado de datos porque no existe ninguna relación directa entre ellas.

$$R = \frac{\Sigma(X-\bar{x})(Y-\hat{Y})}{(n-1)S_xS_y} \quad (7)$$

Ecuación 7. Coeficiente de correlación

Fuente: (Francisco, 2015)

Donde;

ΣX : sumatoria de los valores en “x”

\bar{x} : Promedio de los datos en “x”

ΣY : sumatoria de los valores en “y”

\hat{Y} : Promedio de los datos en “y”

n: valor total del conjunto de datos en análisis

S_x : Desviación estándar en “x”

S_y : Desviación estándar en “y”

Valores Calculados:

- Coeficiente de Correlación R : 0.94
- Coeficiente de Determinación $R^2 = 0.8836$

Una vez obtenido los valores del coeficiente de correlación y el coeficiente de determinación procedentes de la comparación de las series de datos históricos patrón (Surampalti) y observada (Nudpud), se procede a aplicar la fórmula del llenado de los datos faltantes.

Los resultados del llenado de los datos faltantes en cuanto a la variable de precipitación se exponen en la tabla 33.

Tabla 33. Precipitaciones en mm (Llenado de datos faltantes)

	Precipitación en mm											
Fecha	01/01/2013	01/02/2013	01/03/2013	01/04/2013	01/05/2013	01/06/2013	01/07/2013	01/08/2013	01/09/2013	01/10/2013	01/11/2013	01/12/2013
Est. Surampalti	12.20	123.00	90.00	55.10	128.20	0.00	11.70	29.50	20.40	74.40	82.70	44.10
Est. Nudpud	54.60	57.41	71.86	104.44	61.00	167.20	141.80	68.40	62.00	105.00	47.80	35.40
Fecha	01/01/2014	01/02/2014	01/03/2014	01/04/2014	01/05/2014	01/06/2014	01/07/2014	01/08/2014	01/09/2014	01/10/2014	01/11/2014	01/12/2014
Est. Surampalti	106.40	53.40	90.00	79.30	197.00	46.30	56.80	43.70	42.20	137.80	71.50	47.10
Est. Nudpud	83.40	64.60	95.80	100.20	114.20	90.80	90.40	55.00	38.60	109.20	28.60	44.37
Fecha	01/01/2015	01/02/2015	01/03/2015	01/04/2015	01/05/2015	01/06/2015	01/07/2015	01/08/2015	01/09/2015	01/10/2015	01/11/2015	01/12/2015
Est. Surampalti	93.10	39.10	164.20	55.40	43.60	36.10	75.70	26.20	22.60	106.00	75.50	36.50
Est. Nudpud	101.14	42.48	41.20	87.60	56.00	109.40	131.20	59.20	35.20	109.20	28.60	39.65
Fecha	01/01/2016	01/02/2016	01/03/2016	01/04/2016	01/05/2016	01/06/2016	01/07/2016	01/08/2016	01/09/2016	01/10/2016	01/11/2016	01/12/2016
Est. Surampalti	53.60	53.40	157.40	194.40	102.60	110.50	27.80	22.40	70.30	117.80	24.80	0.00
Est. Nudpud	18.40	52.00	57.40	21.40	38.40	0.40	9.92	6.60	51.60	37.80	37.69	1.94

Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar los resultados de los análisis estadísticos etiquetados de color verde empleados para el llenado de los datos, siguen una misma tendencia de acuerdo a los datos registrados por la estación meteorológica de Nudpud, es decir, son valores con los cuales se puede trabajar para el diseño del modelo ambiental.

De la misma manera se obtuvieron los datos faltantes o en cero registrados por la estación meteorológica de Nudpud, en cuanto al parámetro de la temperatura.

5.3 Software, Tratamiento y Gestión de Series Temporales Hidrológicas “TRASERO”.

Después de haber realizado los análisis hidrológicos estadísticos para completar las series de los valores históricos correspondientes a los parámetros de precipitación y temperatura registrados por la estación meteorológica de Nudpud, como paso siguiente al diseño del modelo matemático para las quebradas Llaucay y Cóndor Yacu, se procede a calcular las características hidrológicas como la infiltración y la escorrentía causada por la precipitación dentro de la microcuenca, a su vez con base en la series históricas completas calculamos valores aproximados de los eventos naturales como la Evapotranspiración Potencial, la Evapotranspiración Real y la Lluvia útil. Al determinar valores aproximados de estos eventos naturales se tendrá una mejor comprensión de las características hidrológicas que posee nuestra microcuenca en estudio.

Llamamos valores aproximados ya que no se tienen datos exactos de precipitación y temperatura registrados por la estación meteorológica de Nudpud, pues para completar los datos se tuvo que recurrir a métodos estadísticos hidrológicos que hacen aproximaciones en base a valores numéricos, los mismos no pueden representar eventos puntuales ni condiciones ambientales que se pudieran dar dentro de la microcuenca, razón por la cual al tener como base valores aproximados de temperatura y precipitación los resultados de la escorrentía superficial, infiltración, lluvia útil, evapotranspiración real y evapotranspiración potencial serán también valores aproximados a la realidad hidrológica de la microcuenca del río Tabacay.

Para hallar los valores de la infiltración, la escorrentía, la lluvia útil, la evapotranspiración real y la evapotranspiración potencial se utiliza el software “*Tratamiento y Gestión de Series temporales hidrológicas*” de ahora en adelante “TRASERO” desarrollado por la dirección técnica y coordinación perteneciente a la Diputación Provincial de Alicante España.

5.3.1 Fundamentación teórica.

El software “TRASERO” desarrollado por el departamento técnico y coordinación perteneciente a la Diputación Provincial de Alicante- España, tiene como objetivo

automatizar un conjunto de herramientas estadísticas y matemática utilizadas habitualmente para el tratamiento, análisis y obtención de resultados de series de datos hidrológicos y climatológicos.

Para su descripción, las utilidades incorporadas en la aplicación se han estructurado en tres grupos:

- a) Estudio climático
- b) Análisis estadístico descriptivo
- c) Modelo de transferencia

Para el desarrollo de este trabajo de graduación simplemente se centrará en la parte del estudio climático, la misma que cuenta con cálculos de parámetros como:

- Evapotranspiración Potencial (EVP)
- Evapotranspiración Real (EVR)
- Lluvia útil
- Escorrentía superficial
- Infiltración.

A partir de la temperatura se calcula por el método empírico de Thornthwaite la evapotranspiración potencial. Con la evapotranspiración potencial y la precipitación se calcula, por el método de balance de Thornthwaite y la modificación introducida por G. Girard la evapotranspiración real y la lluvia útil. (Diputación Provincial de Alicante, 2015)

También se puede calcular la infiltración y la escorrentía superficial descomponiendo la lluvia útil según el método del Soil Conservation Service de los E.E.U.U. Este valor de la escorrentía superficial depende de la litología, de la pendiente y de la vegetación.

Conceptos Generales:

Evapotranspiración potencial: Se define como la cantidad de agua que puede volver a la atmósfera por el fenómeno natural de evaporación y transpiración cuando la capacidad del agua en el suelo está completa y el desarrollo vegetal es óptimo.

Evapotranspiración real: Se define como la cantidad de agua que realmente vuelve a la atmósfera. Su valor depende de su disponibilidad bien en forma de lluvia o de la almacenada en el suelo. El límite superior de la ETR viene determinado por la EVP. **(ETR>EVP).**

Lluvia útil: también denominada lluvia eficaz o excedente, corresponde a la cantidad de agua que se escurre superficialmente más la que se infiltra.

5.3.2 Objetivo.

Hallar las series de datos hidrológicos y climatológicos de la microcuenca del río Tabacay correspondiente a sus características hidrológicas como la infiltración, lluvia útil, escorrentía superficial, evapotranspiración real (EVR) y la evapotranspiración potencial (EVP).

Series hidrológicas que datan desde Octubre del año 2010 hasta el mes de Diciembre del año 2016.

5.3.3 Calculo de las características hidrológicas de la microcuenca del río Tabacay.

1. Como primer punto se crea una plantilla de Excel con los valores de las precipitaciones y las temperaturas registradas por la estación meteorológica, teniendo en cuenta el período de tiempo que se va a analizar.
2. Como segundo punto se abre una nueva ventana del software "TRASERO", a la cual se le otorga un nombre y se detalla el período de tiempo del análisis.
3. Como tercer punto se ingresa las series de temperatura y precipitación directamente desde las plantillas realizadas en Excel, teniendo siempre en cuenta los cuadros de diálogo que indican el periodo de tiempo, tipo de datos, el tipo de serie y las unidades con las cuales va a trabajar el sistema.
4. Una vez ingresada las series de precipitación y temperatura, como paso siguiente se procede a calcular los valores de la escorrentía superficial y la infiltración por medio de la herramienta estudio climático. Una vez más teniendo en cuenta el período de análisis, la serie de precipitación y el umbral de escorrentía.
5. Finalmente se calcula la lluvia útil, la evapotranspiración potencial y la evapotranspiración real por medio de la herramienta estudio climático, teniendo en cuenta el período de análisis, las series a utilizar, el método de cálculo, la capacidad de campo y la latitud referentes al cuerpo hídrico en estudio

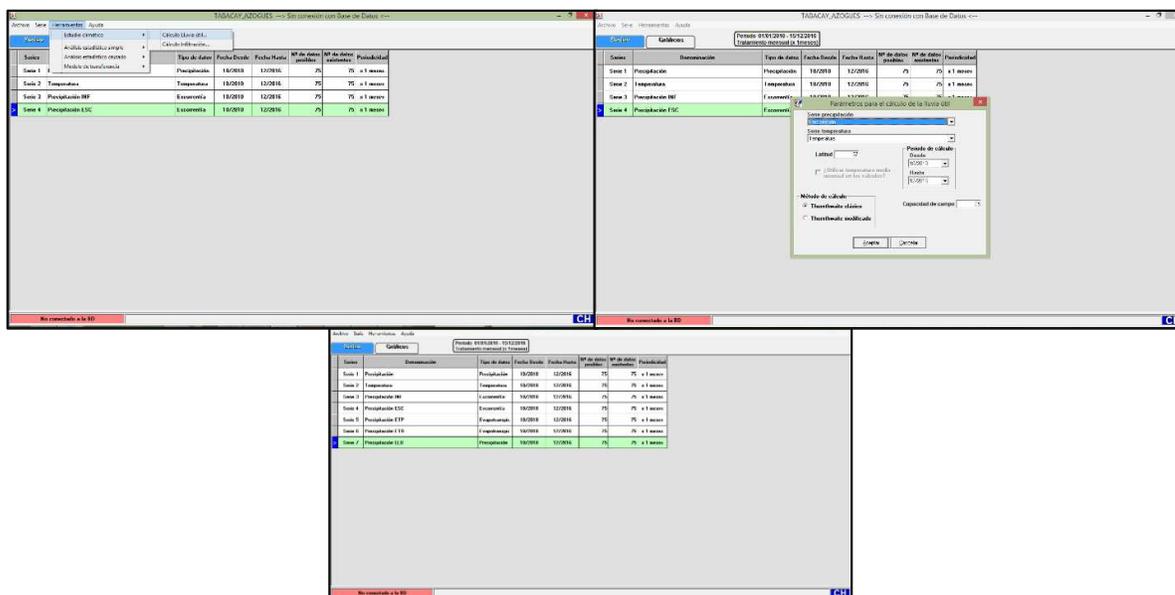


Figura 49. Cálculo de la lluvia útil, la ETP y la ETR mediante el software "TRASERO"
Fuente: Software "TRASERO"

5.3.4 Análisis de Resultados.

El análisis de los resultados obtenidos presentados en la tabla 34, se hará de manera estadística para su mejor comprensión, centrándonos especialmente en los datos de la precipitación y temperatura por ser los parámetros básicos para los cálculos de la lluvia útil, la escorrentía superficial, infiltración y de la ETR y la ETP. Al realizar cálculos estadísticos en base a los datos de la precipitación se obtiene que el valor de tendencia central es igual a 71.25 mm , es decir esa es la media que soporta la microcuenca del Tabacay en los 6 años de observaciones, registrando un valor de precipitación mínimo de 0.40 mm en el mes de junio del año 2016 y un valor máximo de 200.43 mm en el mes de abril del año 2001 época invernal en el austro ecuatoriano. A demás, se puede observar que la dispersión de datos es amplio teniendo un rango igual a 200.03 , lo que da a entender que existe una amplia longitud entre los datos de precipitación registrados.

Mediante la representación gráfica de las desviaciones acumuladas respecto a la media se puede conocer tendencias en el tiempo de la variable analizada. En el caso de datos hidrológicos de precipitación, las pendientes negativas en la figura 50 indican períodos de sequía, mientras que las pendientes positivas indican períodos húmedos. Al graficar la desviación acumulada con la ayuda del software "TRASERO" referente a las precipitaciones registradas, se puede observar en la figura 50 que en los últimos años se produjeron

períodos húmedos dentro de la microcuenca del río Tabacay, factor que favorece al incremento de los caudales y disminución de las concentraciones de los contaminantes que azotan este cuerpo hídrico.

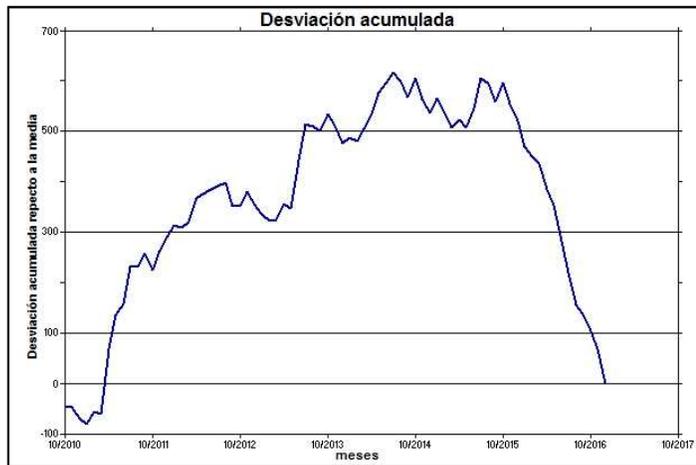


Figura 50: Desviación Acumulada correspondiente a las precipitaciones
Fuente: Software "TRASERO"

En cuanto al parámetro de la temperatura una vez hecho el análisis estadístico da como resultado que su media tiene un valor de $16.92\text{ }^{\circ}\text{C}$, y sus valores de temperatura dentro de las masas de agua varían entre $14\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $16\text{ }^{\circ}\text{C}$ dependiendo del tramo de la microcuenca, dando como resultado concentraciones de oxígeno de saturación entre los $9.9\text{ mgO}_2/\text{l}$ y los $10.3\text{ mgO}_2/\text{l}$ de acuerdo a la tabla 3, valores muy cercanos a los registrados en cada quebrada que varían entre los $7\text{ y }8\text{ mgO}_2/\text{l}$.

Tabla 34. Resultados de los análisis realizados con el software "TRASERO"

Microcuenca del río Tabacay							
Fecha	Precipitación mm	Temperatura °C	Precipitación INF	Precipitación ESC	Precipitación ETP	Precipitación ETR	Precipitación LLU
oct-10	25.21	17.01	21.66	3.55	59.67	25.21	0.00
nov-10	68.81	18.65	37.02	31.79	61.53	61.53	0.00
dic-10	49.20	15.84	31.97	17.23	44.99	44.99	0.00
ene-11	60.21	16.13	35.05	25.16	47.58	47.58	0.00
feb-11	95.81	28.82	41.59	54.22	129.33	119.81	0.00
mar-11	66.21	16.37	36.46	29.75	58.59	58.59	0.00
abr-11	200.43	15.87	49.60	150.83	59.29	59.29	124.14
may-11	139.43	15.94	46.07	93.36	66.62	66.62	72.81
jun-11	93.00	15.70	41.20	51.80	65.23	65.23	27.77
jul-11	144.60	15.49	46.46	98.14	64.73	64.73	79.87
ago-11	73.21	15.56	37.92	35.29	61.28	61.28	11.93
sep-11	96.61	15.89	41.70	54.91	56.08	56.08	40.53
oct-11	37.80	18.82	27.87	9.93	73.75	62.80	0.00
nov-11	109.42	18.70	43.27	66.15	63.93	63.93	20.49
dic-11	100.41	16.15	42.19	58.22	48.82	48.82	51.59
ene-12	93.01	16.56	41.20	51.81	52.14	52.14	40.87
feb-12	65.81	18.49	36.37	29.44	61.78	61.78	4.03
mar-12	83.01	17.77	39.68	43.33	70.39	70.39	12.62
abr-12	119.22	16.92	44.30	74.92	69.33	69.33	49.89
may-12	78.80	13.76	38.96	39.84	54.66	54.66	24.14
jun-12	80.80	15.22	39.30	41.50	65.09	65.09	15.71
jul-12	77.80	17.11	38.78	39.02	80.58	80.58	0.00
ago-12	78.60	15.29	38.92	39.68	62.61	62.61	12.99
sep-12	24.20	14.89	21.06	3.14	52.81	49.20	0.00
oct-12	71.37	16.73	37.55	33.82	61.78	61.78	0.00
nov-12	100.02	17.01	42.15	57.87	55.62	55.62	29.40
dic-12	44.00	19.22	30.24	13.76	66.29	66.29	0.00
ene-13	54.60	16.49	33.57	21.03	52.86	52.86	0.00
feb-13	57.41	17.27	34.34	23.07	56.15	56.15	0.00
mar-13	71.86	16.24	37.65	34.21	61.85	61.85	0.00
abr-13	104.44	16.01	42.69	61.75	64.61	64.61	30.83
may-13	61.00	15.80	35.25	25.75	70.49	70.49	0.00
jun-13	167.20	15.70	47.93	119.27	70.17	70.17	88.03
jul-13	141.80	13.20	46.25	95.55	53.78	53.78	88.02
ago-13	68.40	16.30	36.94	31.46	71.20	71.20	0.00
sep-13	62.00	15.40	35.49	26.51	57.23	57.23	1.77
oct-13	105.00	16.80	42.76	62.24	62.02	62.02	42.98
nov-13	47.80	18.30	31.53	16.27	62.52	62.52	0.00
dic-13	35.40	17.40	26.84	8.56	56.20	45.40	0.00
ene-14	83.40	17.70	39.74	43.66	59.18	59.18	0.00
feb-14	64.60	17.70	36.10	28.50	58.30	58.30	5.30
mar-14	95.80	17.40	41.59	54.21	69.04	69.04	26.76
abr-14	100.20	16.20	42.17	58.03	65.66	65.66	34.54
may-14	114.20	16.50	43.79	70.41	75.44	75.44	38.76
jun-14	90.80	14.10	40.89	49.91	58.64	58.64	32.16
jul-14	90.40	14.60	40.83	49.57	63.17	63.17	27.23
ago-14	55.00	13.10	33.68	21.32	49.61	49.61	5.39
sep-14	38.60	16.10	28.19	10.41	61.34	61.34	0.00
oct-14	109.20	17.80	43.24	65.96	67.97	67.97	18.23
nov-14	28.60	17.20	23.56	5.04	56.28	53.60	0.00
dic-14	44.37	17.30	30.37	14.00	55.48	44.37	0.00
ene-15	101.14	18.00	42.29	58.85	60.65	60.65	15.49
feb-15	42.48	19.20	29.69	12.79	66.44	66.44	0.00
mar-15	41.20	16.40	29.21	11.99	62.41	42.20	0.00
abr-15	87.60	15.90	40.41	47.19	63.41	63.41	0.00
may-15	56.00	15.20	33.96	22.04	65.65	65.65	0.00
jun-15	109.40	15.30	43.27	66.13	66.74	66.74	31.66
jul-15	131.20	15.10	45.40	85.80	66.44	66.44	64.76
ago-15	59.20	14.20	34.80	24.40	56.33	56.33	2.87
sep-15	35.20	15.20	26.76	8.44	55.57	55.57	0.00
oct-15	109.20	17.80	43.24	65.96	62.49	62.49	26.71
nov-15	28.60	17.20	23.56	5.04	51.38	51.38	0.00
dic-15	39.65	17.30	28.61	11.04	50.70	41.65	0.00
ene-16	18.40	19.40	17.19	1.21	64.23	18.40	0.00
feb-16	52.00	17.60	32.83	19.17	52.81	52.00	0.00
mar-16	57.40	17.20	34.33	23.07	61.62	57.40	0.00
abr-16	21.40	17.60	19.28	2.12	68.76	21.40	0.00
may-16	38.40	16.30	28.11	10.29	66.48	38.40	0.00
jun-16	0.40	9.60	0.40	0.00	25.02	0.40	0.00
jul-16	9.92	19.08	9.92	0.00	91.13	9.92	0.00
ago-16	6.60	22.90	6.60	0.00	119.97	6.60	0.00
sep-16	51.60	23.30	32.71	18.89	109.25	51.60	0.00
oct-16	37.80	18.60	27.87	9.93	15.55	15.55	0.00
nov-16	37.69	20.60	27.82	9.87	13.63	13.63	21.06
dic-16	1.94	19.70	1.94	0.00	13.30	13.30	0.00

Fuente: Elaboración propia

5.4 Software, Evaluación de Recursos Hídricos “EvalHid”.

Una vez calculadas y analizadas estadísticamente las series de datos temporales hidrológicos de precipitación, temperatura, escorrentía superficial, infiltración, lluvia útil, evapotranspiración potencial y evapotranspiración real, como paso siguiente al diseño del modelo matemático se procede a calcular la aportación total aproximada que genera la microcuenca del río Tabacay. Al hablar de aportación total se refiere al volumen de agua que genera la microcuenca, es decir, la totalidad de agua que desemboca en un punto de desagüe.

Para el cálculo de este volumen total emplearemos el programa de Evaluación de Recursos Hídricos “EvalHid” desarrollado por el grupo de ingeniería de recursos hídricos de la universidad Politécnica de Valencia España, cuyo programa básicamente realiza una suma del volumen de agua que se infiltra hacia las corrientes subterráneas más el volumen de agua que se escurre superficialmente, teniendo siempre en cuenta consideraciones ambientales y características propias de la microcuenca en estudio.

El programa “EvalHid” calcula la aportación total que genera una cuenca en un período hidrológico, en base a la serie de datos temporales hidrológicos de precipitación, temperatura y la evapotranspiración potencial calculados anteriormente con la ayuda del software “TRASERO”.

Conocer la aportación hídrica total que genera la microcuenca del río Tabacay, es necesaria para la estimación de los caudales que posee este cuerpo hídrico, los mismos que serán ingresados al programa “AQUATOOL” módulo “SIMGES” para el desarrollo del modelo matemático.

Es esencial saber que el programa calcula un volumen de agua total generado por toda la microcuenca, registrado en un punto de desagüe, razón por la cual específicamente para este trabajo de investigación es importante tener en cuenta algunas consideraciones como, que nuestro modelo matemático se centra simplemente en el análisis de los caudales y parámetros de calidad de las quebradas de Cóndor Yacu y Llaucay, que valores de caudales en cero ocasionarán problemas en el diseño del modelo matemático y finalmente los valores de los caudales hallados con el programa “EvalHid” serán comparados con los medidos por la EMAPAL y los datos obtenidos durante el trabajo de campo para conocer la eficiencia y confiabilidad de los datos calculados.

5.4.1 Fundamentación teórica.

El modelo que se plantea el programa “EvalHid” es conceptual agregado de aplicación semidistribuida; es decir, que una cuenca que quiere ser modelada se subdivide en subcuenca y en cada subcuenca se plantea uno de los modelos disponibles en el programa. Para cada subcuenca a modelar es necesario tener los datos de las series temporales hidrológicas de precipitación, evapotranspiración potencial (ETP), temperatura y valor de la superficie de la subcuenca. Si se quiere desarrollar un modelo de nieve es necesario disponer de series temporales de la temperatura del aire. Como es obvio las series temporales deben corresponder a un mismo período de tiempo. En general, también es necesario la disponibilidad de datos aforados, restituidos a régimen natural, que permitan la calibración de los parámetros del modelo. Estos datos observados no son indispensables para la simulación del modelo.

En resumen, las características principales del programa son las siguientes:

- Disponibilidad de diferentes Modelos Precipitación-Escorrentía MPE aplicables según diferentes factores.
- Permite el desarrollo de modelos para grandes cuencas y sistemas complejos.
- Escala temporal configurable y definida por el usuario.
- Posibilidad de modelar, para las subcuencas seleccionadas, exclusivamente la parte superficial estimando la infiltración como una salida del programa.
- Acople con el modelo de simulación de la gestión “SIMGES” y uso del mismo para la modelación de la parte subterránea.

Una vez realizado todos los cálculos, el programa me da diferentes opciones de observación de los resultados, entre las opciones que tenemos Resultados Parciales, Acumulados, Aportaciones y opcionalmente Infiltraciones. El archivo de Resultados Parciales contiene, para cada subcuenca modelada, los diferentes resultados temporales de las variables de estado y de flujo según el modelo seleccionado. El archivo de Acumulados presenta la acumulación temporal de algunas de estas variables. El archivo de aportaciones, recoge para la escala temporal definida en la acumulación, la escorrentía total acumulada en cada uno de los puntos de desagüe superficial definidos, este es el archivo que contiene los datos con los que se trabajará para el diseño del modelo matemático. De la misma forma el archivo de Infiltraciones recoge las infiltraciones acumuladas temporalmente en los puntos de acumulación subterránea.

Para cada subcuenca se puede escoger un modelo de los disponibles en el programa, pues el módulo “EvalHid” cuenta con diferentes modelos que presentan diferentes niveles de complejidad en la modelación hidrológica. Entre estos modelos de análisis hidrológicos

tenemos Témex, HBV y Sacramento y los modelos de nieve denominados Nieve_1 y Nieve_2 cada modelo con sus características y condiciones especiales.

El modelo que se utiliza para calcular la aportación total de la microcuenca del río Tabacay es "Témex", por ser un modelo que considera pocos parámetros en su análisis, lo que hace que su bajo número de parámetros sea especialmente adecuado en cuencas con un número reducido de datos.

5.4.1.1 Unidades.

En el programa "EvalHid" las series temporales de precipitación y la ETP, deben ser introducidas en mm. La escala temporal se define en función de los datos de series temporales. En general lo más común es que estos modelos se apliquen a escala diaria o mensual por lo que los datos de los archivos de precipitación y ETP vengan en mm/mes.

Por defecto se considera que la superficie de la subcuenca se introduce en Km^2 .

5.4.1.2 Archivos de entrada.

El programa "EvalHid" requiere como mínimo cinco archivos de entrada. Un archivo de *configuración* de opciones básicas, un archivo de *Precipitaciones*, un archivo de *ETP*, un archivo de *Datos del Modelo* y un archivo de *Etiquetas*. Estos archivos para que el programa los reconozca deben tener los siguientes nombres: Apo_config.inp, Apo_Precip.inp, Apo_Etp.inp, Apo_Modelos.inp, y Apo_etiquetas.inp. En caso de que se vaya a considerar, en algunas subcuencas, la modelación de la nieve es necesario el archivo de datos de *Temperatura del aire* que debe tener el nombre de Apo_temp.inp.

Los archivos de *Precipitaciones*, *ETP* y *Temperatura del aire* deben ser creados por el usuario aunque existe una herramienta desarrollada en una hoja de cálculo para su creación automática.

5.4.1.3 Descripción del archivo de Aportaciones.

Los resultados contienen las aportaciones acumuladas en tiempo de cada punto de desagüe. El paso del tiempo de acumulación temporal así como que cuencas drenan a cada punto de desagüe se define en el archivo de *Datos del Modelo*, aunque también se puede asignar puntos de desagüe en forma manual dentro del programa. Las unidades de aportación son caudales (Hm^3/mes). Cada caudal se estima multiplicando la aportación por la superficie de la microcuenca.

5.4.2 Objetivo.

Hallar el volumen total de agua generado en la microcuenca del río Tabacay, mediante la utilización del módulo “EvalHid”, programa que forma parte del Sistema Soporte de Decisión “AQUATOOL”.

5.4.3 Cálculo del volumen de agua total generado en la microcuenca del río Tabacay.

Primeramente se proporciona al programa datos y archivos como: superficie de la microcuenca, las series temporales de precipitación y las series temporales correspondientes a la evapotranspiración potencial (ETP) y opcionalmente la también la serie temporal de temperaturas del aire. Para crear estos archivos con el formato correcto se dispone de un libro de Excel (GenerarDatosEvalHid.xlsm) que se encuentra en la carpeta donde se instala el programa “EvalHid”. Con la ayuda de esta plantilla de Excel es posible generar los tres archivos inputs así como un archivo de datos observados que podrá ser utilizado para comparar gráficamente los resultados obtenidos. Siendo necesario recalcar que los valores obtenidos de precipitación, temperatura y ETP mediante el software “TRASERO”, fueron copiados en la plantilla de Excel del generador de datos de “EvalHid”, con el objetivo de crear archivos nuevos que reconozca el programa teniendo en cuenta siempre el mismo período de tiempo establecido desde el inicio.



Nombre	Fecha de modifica...	Tipo	Tamaño
DirTrabajo1	19/05/2017 13:00	Carpeta de archivos	
Apo_Etp	04/04/2017 14:21	Archivo INP	7 KB
Apo_Precip	04/04/2017 14:21	Archivo INP	7 KB
Apo_Temp	04/04/2017 14:21	Archivo INP	7 KB
GeneraDatosEvalHid	17/02/2016 15:36	Hoja de cálculo h...	341 KB
GeneraDatosEvalHidTaba	20/03/2017 17:56	Hoja de cálculo h...	113 KB
Obs	04/04/2017 14:21	Archivo INP	7 KB
TemMax_Tabacay	19/05/2017 14:06	Archivo EHD	712 KB
TemMax_Tabacay.ehd.bak	18/05/2017 18:24	Archivo BAK	712 KB

Figura 51. Vista de un posible directorio de trabajo

Fuente: Elaboración propia

Como paso siguiente se procede a abrir el programa “EvalHid”, el mismo que presenta la opción de crear un proyecto nuevo.

Se introduce los archivos de Precipitación, ETP y Temperatura generados anteriormente, mediante el icono de opciones. Se puede ver que falta por añadir los archivos de precipitación, ETP y temperatura, que aparecen en color rojo. Se da clic en el icono de la lupa y se indica la ruta en la que se encuentran estos archivos los mismo que deben coincidir con la ruta donde se guardó el nuevo proyecto creado.

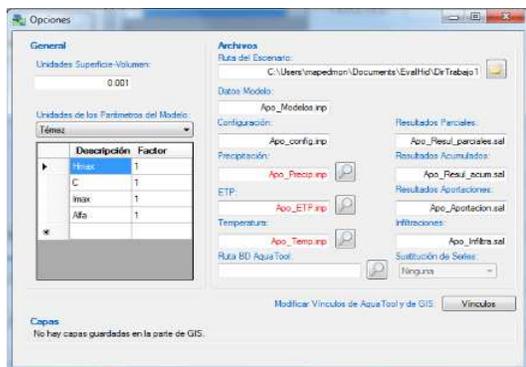


Figura 52. Ventana de Opciones
Fuente: Software "EvalHid"

Una vez seleccionado el archivo de precipitación aparecerá el siguiente mensaje:



Figura 53. Ventana para copiar los archivos de precipitación, ETP y temperatura
Fuente: Software "EvalHid"

Hacemos clic en **Sí**, y se repite la operación para añadir los otros dos archivos. En esta misma ventana se tiene la posibilidad de incluir la ruta de acceso a la base de datos de "AQUATOOL", si es que se tiene el proyecto creado previamente en este software.

Posteriormente se define el período de simulación, aplicando solo una escala mensual que va desde el mes de octubre del año 2010 hasta el mes de diciembre del año 2016.

Se tiene la posibilidad de presentar los resultados de las aportaciones a escala diaria, o bien, agruparlos en meses o años. En este trabajo se va a acumular mensualmente ya que el modelo a desarrollar en el módulo "SIMGES" funcionara a escala mensual.

En el siguiente paso será necesario introducir la información relativa a la microcuenca y el punto de desagüe a asignar. Para ello, como se comentaba anteriormente, es posible introducir cierta clase de información desde capas GIS. Se carga dos capas en formato shape, la primera capa posee en su tabla de atributos información como el área de la microcuenca, el nombre de la microcuenca y un conector entre el shape y el programa "EvalHid", por otra parte la segunda capa será el punto de desagüe creado previamente en ArcGis al delimitar la cuenca hidrográfica.

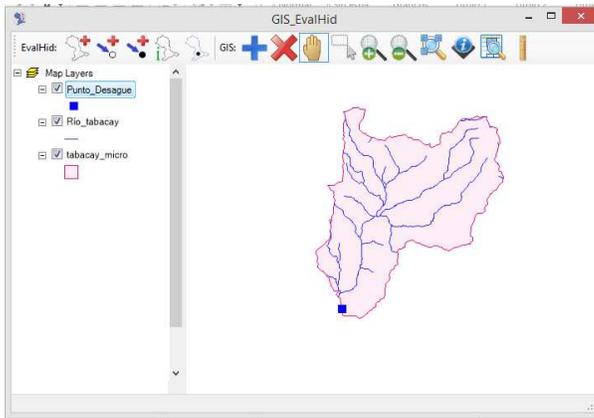


Figura 54. Ventana GIS. Agregar microcuenca seleccionada
Fuente: Software "EvalHid"

A continuación se agrega la microcuenca al EvalHid. Para ello, en el listado de capas, se debe mantener seleccionada la capa "tabacay_micro". Se selecciona toda la microcuenca con ayuda del botón Seleccionar y hacer clic sobre el botón Agregar Subcuencas Seleccionadas. Al agregar la microcuenca en estudio al programa la misma se adicionará con el nombre y el área de la microcuenca seleccionada. Con esto, en la ventana principal de "EvalHid" se podrá ver que ya se agregó la microcuenca del río Tabacay.

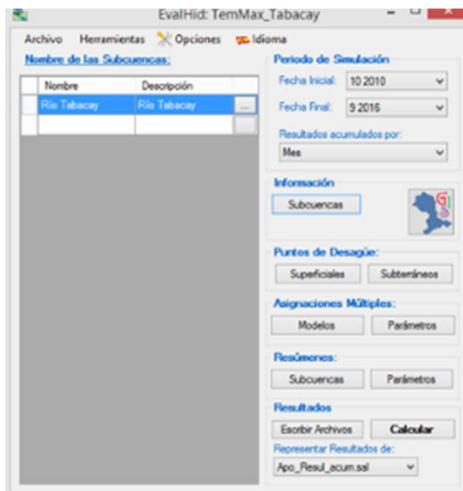


Figura 55. Ventana principal una vez agregado la microcuenca del río Tabacay
Fuente: Software "EvalHid"

Como siguiente fase se asigna los puntos de desagüe mediante una capa shape, con la finalidad de utilizarlos para obtener la escorrentía en un punto determinado como suma de la escorrentía total de una o varias subcuencas.

Para este trabajo de investigación se designó un solo punto de desagüe superficial en la parte de confluencia de las quebradas que conforman la microcuenca, no se designó un punto de desagüe subterráneo debido a que los suelos en este lugar son poco permeables según los estudios expuestos en el “Plan de Manejo Integral de la Microcuenca del Río Tabacay” dando como resultado volúmenes no considerables de agua subterránea, sumado a esto la deficiencia de datos y estudios hidrológicos con los que se cuenta acerca de esta microcuenca.



Figura 56. Asignación del punto de desagüe a la microcuenca
Fuente: Software “EvalHid”

En la figura 56 en la parte derecha se muestra la información relativa a la pestaña **General**. En ella hay que introducir una serie de datos como la superficie de la microcuenca del Tabacay, las columnas correspondientes a la Precipitación, ETP y Temperatura relativas a los archivos de entrada, el ajuste de estos factores (por sí se quiere modificar en un tanto por ciento los datos de entrada), el tipo de modelo de escorrentía (al seleccionar uno aparecerá una nueva pestaña en la parte superior, como en este caso los parámetros del modelo Témez), el tipo de modelo de nieve y la asignación de los puntos de desagüe. Además, se tiene la opción de que en los resultados aparezcan los cálculos intermedios de algunas de las variables del modelo seleccionado (Resultados Parciales).

La selección del tipo de modelo (Témez), se ha realizado de forma manual al igual que la selección de las columnas de precipitación, ETP y temperatura a través de la ventana “Información de las Subcuencas” por motivo de que se está simplemente trabajando con una sola microcuenca y punto de desagüe en general.

Para asignar los parámetros hidrológicos con los que va a trabajar nuestro modelo seleccionado, se hace clic en el botón **Parámetros** ubicado en el apartado de Asignaciones Múltiples dentro de la ventana principal.

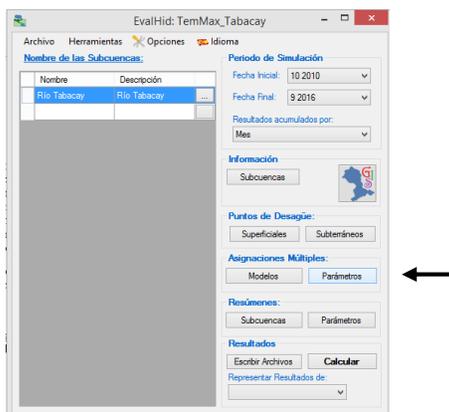


Figura 57. Ventana principal. Asignación Múltiple de Parámetros
Fuente: Software “EvalHid”

El procedimiento consiste en seleccionar el tipo de modelo (en el mismo desplegable se encuentra, tanto los modelos de lluvia-escorrentía, como los modelos de nieve), filtrar por el punto de desagüe, seleccionar las subcuencas a las que se quiere asignar esos parámetros, modificar los parámetros y pulsar sobre el botón **Asignar Parámetros** (Figura 57).

Por lo tanto, se selecciona el modelo Témez y se filtra la aportación PD_Superficial, de este modo los parámetros que se asignen serán los mismos para toda la microcuenca que conforma esa aportación. Los parámetros como humedad inicial, volumen inicial, parámetro de excedente, humedad máxima, capacidad máxima, coeficiente de recesión del acuífero, etc. que utiliza el modelo Témez para los respectivos cálculos hidrológicos fueron tomados de diferentes bibliografías referentes a temas de análisis hidráulicos y de datos de microcuencas semejantes a la microcuenca del río Tabacay, para de esta manera poder estimar valores cercanos a estos coeficientes, pues no existe ningún estudio hidrológico de la microcuenca del río Tabacay el cual avale y tenga en consideración estos coeficientes. Por último se pulsa sobre el botón asignar parámetros.

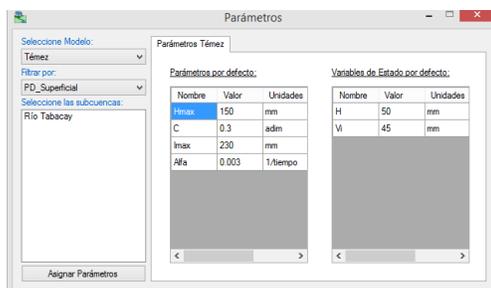


Figura 58. Asignar parámetros del modelo Témez para la microcuenca de la aportación PD_Superficial
Fuente: Software “EvalHid”

Al haber realizado todos los pasos anteriores, se tiene introducida toda la información necesaria para la resolución del ejercicio, la misma que se puede verificar y editar los datos ingresados respecto a la microcuenca de estudio y sus parámetros mediante el icono de resúmenes.

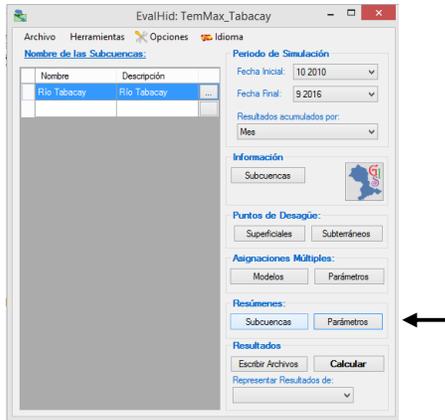


Figura 59. Ventana principal. Resumen de Subcuencas
Fuente: Software “EvalHid”

Para finalizar el desarrollo del modelo hidrológico sólo queda pendiente lanzar el modelo y visualizar los resultados.

Hay que destacar que “EvalHid” permite obtener las series de aportaciones desde el mes de octubre del 2010 hasta el mes de septiembre del 2016, ya que los datos de entrada utilizados (precipitación, ETP y temperatura) abarcan este período de tiempo. Los datos de aportaciones que se obtienen serán utilizados en el modelo de simulación “SIMGES” de la microcuenca del río Tabacay y, por lo tanto, es necesario trabajar con años hidrológicos.

5.4.4 Análisis y Resultados.

Al pulsar sobre el botón calcular. Tras analizar el modelo utilizado para la microcuenca en estudio, y en el caso de que no haya errores, aparecerá un desplegable con varios elementos en función de los resultados que se hayan calculado.



Figura 60. Ventana principal. Elección del tipo de resultados a representa
Fuente: Software “EvalHid”

El programa permite elegir entre dos tipos de resultados:

- Apo_Aportaciones.sal. En este archivo se escriben los resultados de aportaciones para los puntos de desagüe superficial definidos en el modelo. La acumulación temporal así como que cuencas drenan a cada punto de desagüe definido en el modelo. Las unidades de aportación son las mismas que la de los caudales (Hm^3/mes).
- Apo_Resul_acum.sal. este archivo contiene información para todas las cuencas que se simulan. Como resultado se escriben las variables acumuladas en tiempo de: aportación, escorrentía superficial, escorrentía subterránea, evapotranspiración real e infiltración. Todos los resultados de este archivo se encuentran en milímetros (mm). El periodo de acumulación es el definido en el modelo.

Para el análisis de los resultados simplemente se tendrán en cuenta la opción de Apo_Aportaciones.sal, sin datos observados y con un periodo de simulación Mes/Año. Se tendrá en cuenta absolutamente esta opción, debido a que se necesita los datos en forma de caudales del punto de desagüe designado.

Después de haber realizado los respectivos cálculos se obtuvo los valores de las aportaciones para ese punto de desagüe superficial planteado.

Aportaciones		Hm3/mes											
Año	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	
2010										0.00842	0.01397	0.00935	
2011	0.01195	0.05671	0.01395	1.24103	0.70166	0.24567	0.96488	0.16106	0.33284	0.05823	0.28887	0.30892	
2012	0.32661	0.14317	0.19848	0.4978	0.19694	0.20672	0.16509	0.15014	0.09525	0.10894	0.20875	0.10034	
2013	0.10128	0.1024	0.09978	0.09948	0.09979	0.66644	0.71031	0.16639	0.13826	0.34689	0.12823	0.12284	
2014	0.16438	0.13714	0.22814	0.27783	0.41406	0.27749	0.29794	0.16314	0.1469	0.34834	0.14997	0.14953	
2015	0.14908	0.14863	0.14819	0.1679	0.14951	0.23595	0.46727	0.1683	0.1576	0.31304	0.16089	0.1604	
2016	0.15992	0.1595	0.1593	0.15871	0.15823	0.15776	0.15728	0.15681	0.15637				

Tabla 35. Valores mensuales de las aportaciones de la microcuenca del río Tabacay

Fuente: Elaboración propia

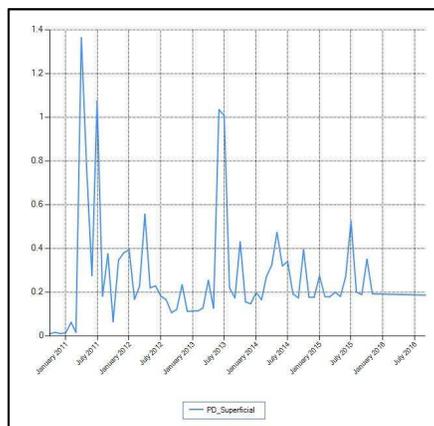


Figura 61. Resultados de las aportaciones de la microcuenca del río Tabacay

Fuente: Elaboración propia

Como se observa los resultados de las aportaciones generadas por la microcuenca del río Tabacay, representan una tendencia de estudio correcta, ya que existen valores elevados en las épocas invernales del austro ecuatoriano, como es en el caso, del mes de abril que sumada sus aportaciones en los 6 años de análisis nos da un resultado de $2.44275 \text{ Hm}^3/\text{mes}$ y en el mes de julio que es el período cuando se producen precipitaciones máximas en la parte alta de la microcuenca se tiene un valor de $2.76277 \text{ Hm}^3/\text{mes}$. Pero como se explicó anteriormente los resultados de las aportaciones calculadas representan a nivel general toda la microcuenca y nuestro modelo matemático naturalmente corresponde a las quebradas de Llaucay y Cóndor Yacu, motivo por el cual es necesario dar proporcionalidades a las aportaciones de las cinco quebradas que conforman la microcuenca del río Tabacay en base a sus caudales observados y al *“Plan de Manejo Integral de la Microcuenca del río Tabacay”*.

Una vez revisado la bibliografía correspondiente, de haber analizado los datos de los caudales medidos por la EMAPAL en las 5 quebradas que conforman la microcuenca del río Tabacay y en base al trabajo autónomo de campo respecto a la medición de caudales en las quebradas Cóndor Yacu y Llaucay, se procedió a dar dividir los resultados de las aportaciones totales para ajustar a los valores aproximados correspondientes a las quebradas a modelar.

Los resultados simulados por el programa “EvalHid” necesitan pasar por un proceso de calibración de las aportaciones generadas, teniendo en cuenta los parámetros del modelo hídrico elegido y en base a los datos medidos en el trabajo de campo, pero en este caso especial no se puede calibrar los resultados, pues no se cuentan con datos medidos de los caudales en el punto de desagüe superficial, simplemente se tiene valores de caudales medidos a 10 metros de las captaciones de cada quebrada, razón por la cual, las aportaciones generadas por el programa “EvalHid” se dividen para cada una de las quebradas y se comparan con los datos medidos en las captaciones, con el objetivo de saber si siguen una misma tendencia de resultados, teniendo en cuenta las unidades en las que se encuentran los datos simulados y los datos observados.

Tabla 36. Aportaciones de las quebradas que conforman la microcuenca del río Tabacay

Aportaciones		Porcentajes				
Pto Superf	Hm3/mes	22.28	8.72	10.42	19.99	38.60
Fechas	Pto_Superf	Condoryacu	Rosario	Mapayacu	Nudpud	Laucay
01/10/2010	0.00842	0.0018760	0.00073	0.00088	0.00168	0.00325
01/11/2010	0.01397	0.0031126	0.00122	0.00145	0.00279	0.00539
01/12/2010	0.00935	0.0020832	0.00082	0.00097	0.00187	0.00361
01/01/2011	0.01195	0.0026625	0.00104	0.00124	0.00239	0.00461
01/02/2011	0.05671	0.0126351	0.00495	0.00591	0.01133	0.02189
01/03/2011	0.01395	0.0031081	0.00122	0.00145	0.00279	0.00538
01/04/2011	1.24103	0.2765048	0.10823	0.12925	0.24804	0.47900
01/05/2011	0.70166	0.1563317	0.06119	0.07308	0.14024	0.27082
01/06/2011	0.24567	0.0547359	0.02143	0.02559	0.04910	0.09482
01/07/2011	0.96488	0.2149778	0.08415	0.10049	0.19285	0.37241
01/08/2011	0.16106	0.0358846	0.01405	0.01677	0.03219	0.06216
01/09/2011	0.33284	0.0741576	0.02903	0.03467	0.06652	0.12847
01/10/2011	0.05823	0.0129738	0.00508	0.00606	0.01164	0.02247
01/11/2011	0.28887	0.0643610	0.02519	0.03009	0.05774	0.11149
01/12/2011	0.30892	0.0688282	0.02694	0.03217	0.06174	0.11923
01/01/2012	0.32661	0.0727696	0.02848	0.03402	0.06528	0.12606
01/02/2012	0.14317	0.0318987	0.01249	0.01491	0.02862	0.05526
01/03/2012	0.19848	0.0442219	0.01731	0.02067	0.03967	0.07661
01/04/2012	0.4978	0.1109112	0.04341	0.05185	0.09949	0.19213
01/05/2012	0.19694	0.0438788	0.01718	0.02051	0.03936	0.07601
01/06/2012	0.20672	0.0460578	0.01803	0.02153	0.04132	0.07979
01/07/2012	0.16509	0.0367825	0.01440	0.01719	0.03300	0.06372
01/08/2012	0.15014	0.0334516	0.01309	0.01564	0.03001	0.05795
01/09/2012	0.09525	0.0212220	0.00831	0.00992	0.01904	0.03676
01/10/2012	0.10894	0.0242721	0.00950	0.01135	0.02177	0.04205
01/11/2012	0.20875	0.0465101	0.01821	0.02174	0.04172	0.08057
01/12/2012	0.10034	0.0223560	0.00875	0.01045	0.02005	0.03873
01/01/2013	0.10128	0.0225655	0.00883	0.01055	0.02024	0.03909
01/02/2013	0.1024	0.0228150	0.00893	0.01067	0.02047	0.03952
01/03/2013	0.09978	0.0222312	0.00870	0.01039	0.01994	0.03851
01/04/2013	0.09948	0.0221644	0.00868	0.01036	0.01988	0.03840
01/05/2013	0.09979	0.0222335	0.00870	0.01039	0.01994	0.03852
01/06/2013	0.66644	0.1484846	0.05812	0.06941	0.13320	0.25722
01/07/2013	0.71031	0.1582589	0.06195	0.07398	0.14197	0.27416
01/08/2013	0.16639	0.0370721	0.01451	0.01733	0.03326	0.06422
01/09/2013	0.13826	0.0308047	0.01206	0.01440	0.02763	0.05336
01/10/2013	0.34689	0.0772880	0.03025	0.03613	0.06933	0.13389
01/11/2013	0.12823	0.0285700	0.01118	0.01336	0.02563	0.04949
01/12/2013	0.12284	0.0273691	0.01071	0.01279	0.02455	0.04741
01/01/2014	0.16438	0.0366243	0.01434	0.01712	0.03285	0.06345
01/02/2014	0.13714	0.0305552	0.01196	0.01428	0.02741	0.05293
01/03/2014	0.22814	0.0508302	0.01990	0.02376	0.04560	0.08805
01/04/2014	0.27783	0.0619013	0.02423	0.02894	0.05553	0.10723
01/05/2014	0.41406	0.0922537	0.03611	0.04312	0.08276	0.15981
01/06/2014	0.27749	0.0618255	0.02420	0.02890	0.05546	0.10710
01/07/2014	0.29794	0.0663818	0.02598	0.03103	0.05955	0.11500
01/08/2014	0.16314	0.0363480	0.01423	0.01699	0.03261	0.06297
01/09/2014	0.1469	0.0327297	0.01281	0.01530	0.02936	0.05670
01/10/2014	0.34834	0.0776111	0.03038	0.03628	0.06962	0.13445
01/11/2014	0.14997	0.0334137	0.01308	0.01562	0.02997	0.05788
01/12/2014	0.14953	0.0333157	0.01304	0.01557	0.02989	0.05771
01/01/2015	0.14908	0.0332154	0.01300	0.01553	0.02980	0.05754
01/02/2015	0.14863	0.0331152	0.01296	0.01548	0.02971	0.05737
01/03/2015	0.14819	0.0330171	0.01292	0.01543	0.02962	0.05720
01/04/2015	0.1679	0.0374086	0.01464	0.01749	0.03356	0.06480
01/05/2015	0.14951	0.0333112	0.01304	0.01557	0.02988	0.05771
01/06/2015	0.23595	0.0525703	0.02058	0.02457	0.04716	0.09107
01/07/2015	0.46727	0.1041090	0.04075	0.04867	0.09339	0.18035
01/08/2015	0.1683	0.0374977	0.01468	0.01753	0.03364	0.06496
01/09/2015	0.1576	0.0351137	0.01374	0.01641	0.03150	0.06083
01/10/2015	0.31304	0.0697461	0.02730	0.03260	0.06257	0.12082
01/11/2015	0.16089	0.0358467	0.01403	0.01676	0.03216	0.06210
01/12/2015	0.1604	0.0357375	0.01399	0.01671	0.03206	0.06191
01/01/2016	0.15992	0.0356306	0.01395	0.01666	0.03196	0.06172
01/02/2016	0.1595	0.0355370	0.01391	0.01661	0.03188	0.06156
01/03/2016	0.1593	0.0354925	0.01389	0.01659	0.03184	0.06148
01/04/2016	0.15871	0.0353610	0.01384	0.01653	0.03172	0.06126
01/05/2016	0.15823	0.0352541	0.01380	0.01648	0.03163	0.06107
01/06/2016	0.15776	0.0351493	0.01376	0.01643	0.03153	0.06089
01/07/2016	0.15728	0.0350424	0.01372	0.01638	0.03144	0.06071
01/08/2016	0.15681	0.0349377	0.01368	0.01633	0.03134	0.06052
01/09/2016	0.15637	0.0348396	0.01364	0.01629	0.03125	0.06035

Fuente: Elaboración propia

5.5 Desarrollo del modelo de calidad de agua en el software “AQUATOOL”.

Un modelo es una simplificación de la realidad que permite simular el comportamiento de la misma. La simulación conjunta a escala de cuenca representa un equilibrio entre los modelos simplificados de simulación de la gestión y los detallistas de la calidad. A continuación se describe el proceso seguido para el diseño del modelo matemático que integra tanto la parte de gestión así como la de calidad dentro de la microcuenca del río Tabacay.

Lo más común es diseñar primero un modelo de gestión para luego reforzarlo teniendo en cuenta la calidad. Un modelo de gestión que trabaje conjuntamente con las demandas y las aportaciones del sistema hídrico, para que sea la base del diseño de un modelo de calidad de agua que analice parámetros representativos ante la contaminación que enfrenta la microcuenca en estudio.

Debido a la simplicidad de los modelos de gestión se suelen tener que realizar adaptaciones para poder acoplar a un modelo de calidad. En particular suele ser bastante común tener que ampliar el número de tramos debido a diferentes causas como son:

- Es conveniente que en los puntos en donde se dispondrá de datos de calidad, sea al inicio y final del tramo para una mejor calibración del modelo.
- Puede que, para algunas zonas, existan modelos previamente desarrollados y que interese una coordinación de elementos entre los modelos.
- Los tramos de río deber representar zonas homogéneas en cuanto a propiedades hidráulicas se refiere.
- El modelo de calidad desarrollado sólo admite la ubicación de los vertidos en nudos.
- Otro condicionante puede ser un particular interés en una zona de estudio. En general, en las zonas más conflictivas suele ser necesario un mayor detalle de estudio, lo que repercute en la fragmentación de un tramo de río.

En el caso del estudio de las quebradas Llaucay y Cóndor Yacu que forman parte de la microcuenca del río Tabacay, el incremento de tramos de río no ha sido necesario, pues la deficiencia de datos de caudales así como de calidad han sido el limitante para no realizar un estudio exhaustivo de estos sistemas hídricos, llevando simplemente a ejecutar un estudio en donde se simule dos tramos para cada quebrada en análisis. El primer tramo representaría la zona cerca de la captación, pues se cuentan con datos de calidad y de caudales medidos en este lugar, los mismo que representarían la contaminación total que llega resumida hacia la parte baja de las quebradas, el segundo tramo representaría la parte

alta de cada quebrada, es decir la zona que no representaría mayor intervención antropogénica, dando como resultado menos contaminación, aquí se dispondrían de datos en base a los valores medidos en el “ICA_3” en el trabajo autónomo de campo, los mismos que representarían valores bajos de contaminación para fuentes naturales sin intervención humana.

Como parte del diseño del modelo de calidad de agua, se considera a las quebradas Llaucay y Cóndor Yacu como cuerpos hídricos unidimensionales por las características morfológicas que poseen. Los parámetros que intervienen en las simulaciones son analizados y justificados dentro de los rangos típicos que establece los manuales del programa utilizado, con el objetivo de asegurar un correcto funcionamiento del modelo.

Para obtener los parámetros de trabajo adecuados con los que el modelo se comporte de manera que represente fielmente la realidad de las quebradas en análisis, los valores simulados por el programa “AQUATOOL” son comparados con los datos observados por la EMAPAL en los tramos antes de las captaciones, donde se resume la contaminación. El proceso de simulación y las consideraciones tomadas se describen en los siguientes procesos.

La simulación consta de un período de tiempo que va desde el mes de octubre del año 2010 hasta el mes de septiembre del año 2016, respetando el año hidrológico que manda el programa y en base a los datos medidos por la EMAPAL en las quebradas del río Tabacay.

5.5.1 Esquema del modelo.

A continuación se realiza una descripción de los elementos considerados en la modelación conjunta gestión- calidad. En la figura 62 se muestra una gráfica del esquema completo. Para mayor claridad se realiza una descripción por tramos.

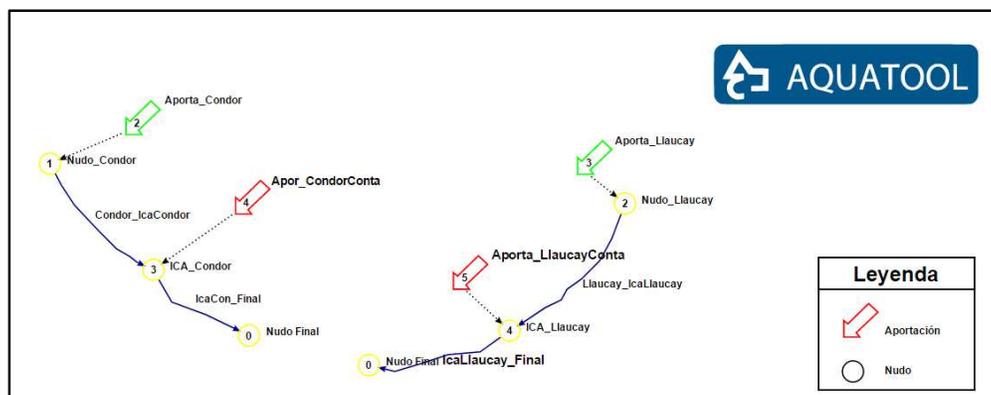


Figura 62. Esquema de la microcuenca del río Tabacay
Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar en la figura 62, el esquema diseñado para la modelación de las quebradas Llaucay y Cóndor Yacu es bastante sencillo debido a la deficiencia de una red de monitoreo ambiental que proporcione datos históricos verídicos y confiables en cada uno de los tramos de las quebradas analizadas, a su vez el modelo a desarrollar se centra específicamente en los datos de calidad medidos en el campo. Cada quebrada cuenta con tres nudos que representan los puntos significativos del esquema, tales como entradas de flujo y cambio en las características del río o de la conducción, un nudo no requiere datos, solo el nombre que se utilizara para identificarlo.

Una vez definido los nudos, es necesario definir las conexiones que existen entre ellos. Las conducciones están siempre orientadas, desde un “nudo inicial” a un “nudo final”. Las conducciones utilizadas para representar el modelo son las conducciones de “tipo 1”, las mismas que hacen referencia a conexiones sin ninguna característica especial. Las conducciones de “tipo 1” permiten la definición de caudales mínimos y máximos mensuales, cumpliendo la siguiente regla de operación que $0 \leq Q_{\min} \leq Q_{\max}$. (El modelo de cálculo permite caudales inferiores al caudal mínimo, pero nunca superiores al caudal máximo) y distintas reglas de operación para controlar el flujo por la misma como son: “Volumen Máximo Anual” que permite incluir un límite máximo al volumen anual que circula por la conducción, “Coste del tramo” que está asociado a la optimización del esquema, y permite seleccionar el costo de la circulación de una unidad de agua por la conducción, “Nivel de Fallo Mensual (%)” que es el porcentaje de fallos admitidos en el caudal mínimo, que se habilita si algún caudal mínimo es distinto de cero, “Prioridad caudal mínimo” que permite establecer un orden de importancia relativo para el caudal mínimo y por último los “Indicadores de alarma” que permiten definir una regla de operación de la conducción que limita su caudal máximo mensual o anual, según la elección del usuario.

Descripción de la conducción (Tipo 1)

Nombre: IcaLlaucay_Final

SimGes Calidad

Caudales (Hm ³ /mes)			
Mes	Mínimo	Mes	Máximo
Octubre	0.001	Octubre	10000
Noviembre	0.001	Noviembre	10000
Diciembre	0.001	Diciembre	10000
Enero	0.001	Enero	10000
Febrero	0.001	Febrero	10000
Marzo	0.001	Marzo	10000
Abril	0.001	Abril	10000
Mayo	0.001	Mayo	10000
Junio	0.001	Junio	10000
Julio	0.001	Julio	10000
Agosto	0.001	Agosto	10000
Septiembre	0.001	Septiembre	10000

Coste del tramo

No Coste

Coste unidad o by pass

Coste elección usuario

Coste del flujo: 0

Número de prioridad caudal mínimo: 1

Nivel de fallo mensual (%): 1

Vol. Máx. Anual

Ilimitado

Limitado

Regla de operación

Nueva... [dropdown]

Sobre máximo anual

Sobre máximo mensual

Sobre máximo anual y mensual

Sobre mínimo mensual

Aceptar

Figura 63. Ficha de datos para la conducción tipo 1
Fuente: Software “AQUATOOL”

Al ser el tema de investigación un modelo de calidad de agua no se considera demandas de agua por parte de la población pero si se consideró las aportaciones que son los flujos de agua que se incorporan al sistema, de forma puntual en los nudos establecidos. Nuestro esquema cuenta con cuatro aportaciones, las mismas que están representadas por flechas de color verde y roja. La flecha verde representa aportaciones con concentraciones mínimas de las variables de calidad analizadas en la parte alta de las quebradas, mientras que la flecha roja que representa concentraciones altas de las variables de calidad estudiadas en los tramos antes de las captaciones.

Las aportaciones es un dato incorporado al modelo mediante un archivo de datos externo creado previamente en una plantilla de Excel (que debe estar en la carpeta de escenario), o también se pueden ingresar los datos de las aportaciones en forma manual. Para este trabajo de investigación se ingresaron los datos de las aportaciones a través de la plantilla de Excel.

Es necesario aclarar que simplemente se calibro los valores de calidad conseguidos mediante el módulo "GESCAL".

5.5.2 Descripción de los elementos del modelo.

A continuación se describen los diferentes elementos creados en el modelo y las estimaciones necesarias para su inclusión en el modelo de calidad. Se ha realizado la modelación de las siguientes variables de calidad:

- Sólidos Suspendidos (SS)
- Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅)
- Oxígeno Disuelto
- Nitrógeno Orgánico (NO)
- Amonio (NH₄)
- Nitratos (NO₃)

Dentro del ciclo del nitrógeno que comprende nitrógeno orgánico, amonio, nitritos y nitratos se estimaron los valores del nitrógeno orgánico por la falta de disponibilidad de datos, la valoración se realizó en base a los datos observados por la EMAPAL de los parámetros de amonio, nitritos y nitratos. No se consideró la modelación de nitritos por ser una reacción violenta el paso de amonio a nitratos.

5.5.2.1 Aportaciones.

Todo modelo de gestión necesita como dato de entrada las aportaciones al sistema. En el módulo "SIMGES" se han definido como elementos de aportación para las quebradas Llaucay y Cóndor Yacu los siguientes.

Quebrada Llaucay

Aporta_Llaucay

Aporta_LlaucayConta

Quebrada Cóndor Yacu

Aporta_Condor

Aporta_CondorConta

En el esquema diseñado para la modelación se puede observar que cada quebrada está dividida en dos tramos distintos separados por las aportaciones, los mismos que representan la parte alta con poca intervención antropogénica y con concentraciones bajas de las variables de calidad y una parte baja que experimenta gran intervención antropogénica con altas concentraciones de las variables de calidad. Los valores obtenidos de las aportaciones mediante el programa "EvalHid" se dividió en proporcionalidades del 70% para parte alta de las quebradas por poseer una conducción mucho más extensa y un 30% de la aportación para la parte baja de las quebradas. Como se muestra en la tabla 37.

Tabla 37. Proporcionalidades de aportaciones

Aportaciones		Llaucay			Cóndor Yacu		
Pto_Superf	Hm3/mes	Aportación	P_Alta	P_Baja	Aportación	P_Alta	P_Baja
Fechas	Pto_Superf	Total	70%	30%	Total	70%	30%
01/10/2010	0.00842	0.00325	0.002	0.001	0.0018760	0.001	0.001
01/11/2010	0.01397	0.00539	0.004	0.002	0.0031126	0.002	0.001
01/12/2010	0.00935	0.00361	0.003	0.001	0.0020832	0.001	0.001
01/01/2011	0.01195	0.00461	0.003	0.001	0.0026625	0.002	0.001
01/02/2011	0.05671	0.02189	0.015	0.007	0.0126351	0.009	0.004
01/03/2011	0.01395	0.00538	0.004	0.002	0.0031081	0.002	0.001
01/04/2011	1.24103	0.47900	0.335	0.144	0.2765048	0.194	0.083
01/05/2011	0.70166	0.27082	0.190	0.081	0.1563317	0.109	0.047
01/06/2011	0.24567	0.09482	0.066	0.028	0.0547359	0.038	0.016
01/07/2011	0.96488	0.37241	0.261	0.112	0.2149778	0.150	0.064
01/08/2011	0.16106	0.06216	0.044	0.019	0.0358846	0.025	0.011
01/09/2011	0.33284	0.12847	0.090	0.039	0.0741576	0.052	0.022
01/10/2011	0.05823	0.02247	0.016	0.007	0.0129738	0.009	0.004
01/11/2011	0.28887	0.11149	0.078	0.033	0.0643610	0.045	0.019

Fuente: Elaboración propia

En cuanto al módulo "GESCAL" donde se ingresan las concentraciones de las variables de calidad, se tomaron datos de concentraciones que representen cuerpos hídricos contaminados en la parte baja de las quebradas y cuerpos hídricos sin intervención antropogénica en la parte alta, en base a los parámetros establecidos por "TULSMA" libro VI, anexo 1 sobre la calidad de agua y de acuerdo a la "Directiva del Marco del Agua" para

sistemas naturales. Para ingresar los valores de las aportaciones, se utilizó el generador de datos de “AQUATOOL” respetando el mismo periodo de tiempo de simulación.

Las aportaciones consideran valores bajos y altos de concentraciones, creándose vertidos ficticios que representan todos vertidos puntuales provenientes de las actividades agrícolas, ganaderas e industriales que desembocan en los cursos de agua de estas quebradas, influyendo significativamente en la dilución y generación de contaminantes dentro de los cuerpos hídricos, al generar estos vertidos ficticios se procura realizar un análisis general que personifique la realidad hidrológica de estas quebradas a modelar.

5.5.2.2 Conducciones.

El esquema del modelo de las quebradas Llaucay y Cóndor Yacu, cuenta con cuatro conducciones del tipo 1, es decir, es un tipo de conducción que no tienen ninguna característica especial, no hace cálculos de pérdidas por filtración ni son utilizadas para definir una conexión entre un acuífero al sistema hídrico superficial, simplemente es un conector entre los nudos generados para modelar en el esquema.

Todas las conducciones se consideran tanto para el modelo de gestión como para el modelo de calidad. Ello es debido a que, las cuatro conducciones trazadas poseen extensiones considerables que van desde la parte alta de cada una de las quebradas hasta el punto de las captaciones, que es el lugar donde se calibrara el modelo. El tener una gran extensión en cada tramo a modelar, favorece a que existan reacciones entre las variables de calidad a determinadas condiciones ambientales, teniendo efecto sobre la calidad de agua.

Se ha realizado una calibración de los coeficientes inmersos en la hidráulica de las quebradas de acuerdo a los límites establecidos en la literatura y en el manual técnico de manejo del módulo “GESCAL”. Los parámetros utilizados son los expuestos en la tabla 38. En la siguiente tabla se muestran los valores de los coeficientes que considera el módulo de calidad, necesarios para su modelación.

Tabla 38. Elementos conducción-Modelo calidad de Agua

Conducciones	Longitud (m)	Ax(m)	α_u	β_u	α_H	β_H
Llaucay_IcaLlaucay	5883	50	0.05	0.43	0.585	0.45
IcaLlaucay_Final	250	50	0.05	0.43	0.585	0.45
Condor_IcaCondor	4602	50	0.05	0.43	0.585	0.45
IcaCon_Final	250	50	0.05	0.43	0.585	0.45

Fuente: Elaboración propia

Dónde:

-La longitud del tramo del río esta expresada en metros. Esta Longitud se ha obtenido a partir de la información de la red hidrográfica disponible.

- ΔX representa el incremento para el cálculo de la calidad de cada tramo. Para estimar el diferencial de cálculo para todas las conducciones, en primer lugar se ha comprobado que un diferencial de 50 m produciría resultados suficientemente precisos para todas las variables.

- α_u y β_u representan los coeficientes de estimación de velocidad a partir del caudal.

- α_H y β_H representan los coeficientes de estimación de profundidad a partir del caudal.

Tanto para la modelación como para la caracterización de la calidad de agua en los tramos de ríos es necesario conocer la hidráulica del sistema, es decir, la relación entre los caudales y las variables hidráulicas como son: las velocidades, calados, áreas, etc.

Las dos posibilidades de modelación hidráulica de los ríos que permite el módulo GESCAL son: el establecimiento de ecuaciones empíricas potenciales entre el caudal y las distintas variables o la aplicación de la ecuación de Manning para resolver el problema.

Para este caso de la modelación de calidad de agua de las quebradas Llaucay y Cóndor Yacu, se utilizó el método de Manning, que es un procedimiento de ajuste de parámetros hidráulicos antes mencionados, y por tanto es completamente empírica en su naturaleza. Debido a su simplicidad de forma y a los resultados satisfactorios que arroja para aplicaciones prácticas, el método de Manning se ha hecho el más utilizado en todas las fórmulas de flujo uniforme para cálculos de escurrimiento en sistemas naturales.

5.5.2.3 Factor Temperatura.

En cuanto a la temperatura de las conducciones, esta no se modela sino que se introduce como input de cada masa de agua, es decir, se traza una curva temporal para cada conducción dibujada en el módulo de calidad. Para el esquema de modelación se diseñó dos curvas temporales en base a los datos medidos en el trabajo autónomo de campo y los datos medidos por la EMAPAL. La curva temporal que representaría la parte alta de las quebradas se llama "NudoInicial_Ica" las misma que tendría temperaturas que variarían entre los 8.5 °C y los 10.1 °C según los datos medidos en el campo y la curva temporal que representaría la parte baja de las quebradas se define como "ICA_Final" la misma que tendría temperaturas que variarían entre los 14.5 °C y los 19.8 °C de acuerdo a los datos medidos por la EMAPAL en la parte baja de las quebradas.

La temperatura se introduce mediante un valor y una curva temporal como antes se mencionó. Como estos valores son definitivos para la escala de tiempo simulada, la temperatura base será igual a 1.

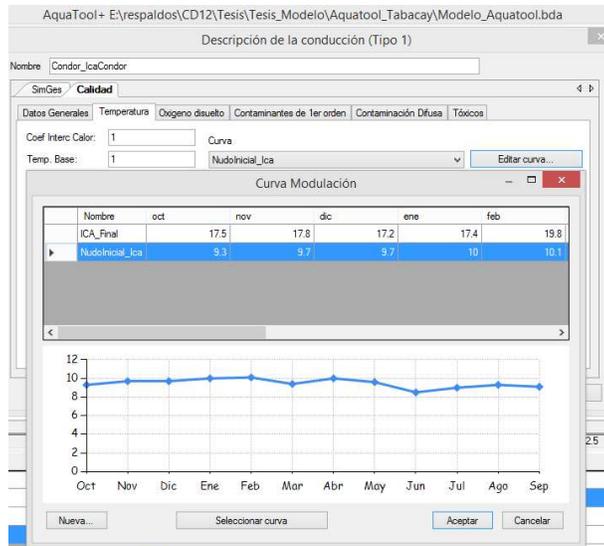


Figura 64. Ventana de análisis de temperaturas
Fuente: Elaboración propia

Después de haber creado las curvas temporales para los diferentes tramos de las quebradas se debe volver a las fichas de la conducción en la que se estaba trabajando y asignar a cada conducción la curva que contiene la variabilidad temporal de la temperatura de esa masa de agua.

La velocidad de las reacciones que se consideran en el modelo aumenta con la temperatura, según la ecuación de Arrhenius:

$$kT = K(20^\circ) \cdot \theta^{T-20} \quad (8)$$

Ecuación 8. Ecuación de Arrhenius

Fuente: (Svante Arrhenius, 1889)

Donde $K(T)$ es el valor de la constante a la temperatura T , $K(20)$ es el valor de la constante a 20°C y θ es el factor de corrección de temperatura y depende del proceso.

La ecuación de Arrhenius es una expresión matemática que se utiliza para comprobar la dependencia de la constante de velocidad (o cinética) de una reacción química con respecto a la temperatura a la que se lleva a cabo esa reacción.

5.5.3 Parámetros para la modelación en conducciones del oxígeno disuelto, el ciclo del nitrógeno y la eutrofización.

Para la modelación del oxígeno disuelto, hay que tener en cuenta diferentes parámetros a modelar que considera el módulo “GESCAL”.

En la figura 65 se expone una plantilla con los valores referentes a los parámetros de calidad como: oxígeno disuelto, ciclo del nitrógeno y problema de eutrofización. La plantilla muestra la descripción del parámetro, el valor y en que unidades debe introducirse.

Los parámetros considerados en esta plantilla serán calibradas en función de los resultados de los análisis de las muestras de agua examinadas en el laboratorio.

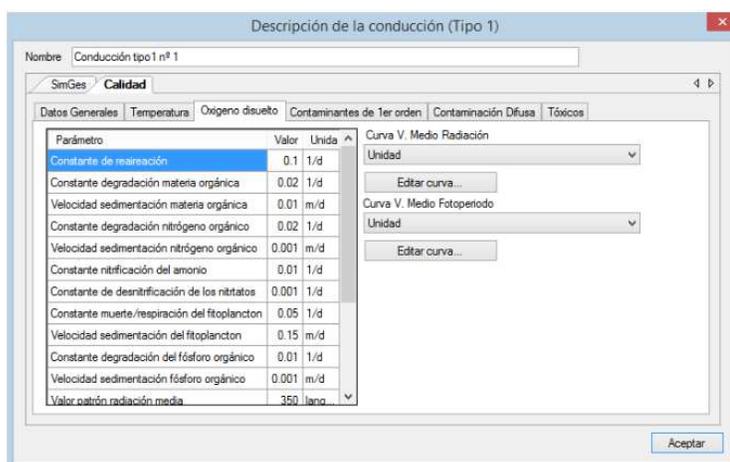


Figura 65. Parámetros referentes a la modelación de oxígeno disuelto, ciclo del nitrógeno y fitoplancton
Fuente: Software “AQUATOOL”

Aunque, independientemente de la opción de modelación, aparecen todos los parámetros a modelar. Para una modelación básica, es decir oxígeno disuelto y materia orgánica se debe introducir valores para los parámetros relacionados con la reaireación del oxígeno disuelto, la degradación y sedimentación de la materia orgánica. Para este caso en particular, debido a que la dinámica de reaireación es inestable en cada tramo de la quebrada se va a calcular esta constante por medio del método Covar.

Para la modelación del ciclo del nitrógeno hay que asignar valores para las constantes de degradación y sedimentación del nitrógeno orgánico, las constantes de nitrificación del amonio y, en el caso de que existiera condiciones anóxicas, la constante de desnitrificación.

Como no se considera parámetros relacionados con el fitoplancton y fósforo orgánico e inorgánico se puede dejar con los valores que parecen por defecto porque el programa no los considera.

5.5.4 Parámetros para la modelación en conducciones de los constituyentes de primer orden.

Para los contaminantes arbitrarios se considera un proceso de descomposición modelado mediante una cinética de primer orden y un proceso de sedimentación de la parte particulada.

Para este modelo se considera como constituyente de primer orden los sólidos suspendidos, variable de calidad a la cual se deberá de introducir valores de la constante de degradación de primer orden y la velocidad de sedimentación, el mismo también se calibrará en base de los datos conseguidos en el laboratorio.

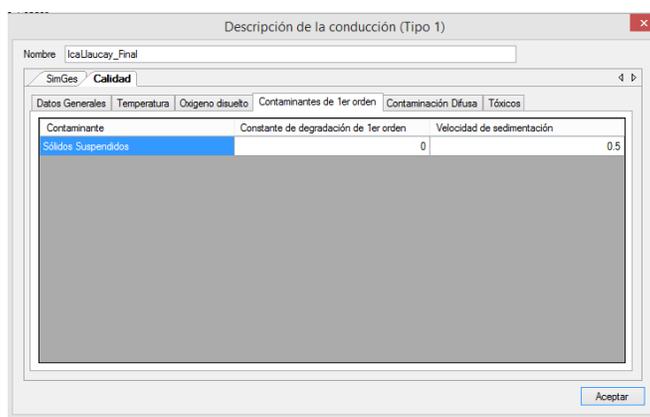


Figura 66. Parámetros de los constituyentes de primer orden
Fuente: Software "AQUATOOL"

Las cargas de contaminación difusa en los tramos de los ríos, no se consideran para este modelo de calidad de agua, ya que se tiene en cuenta una sola carga contaminante que ingresa de forma puntual hacia los cursos de agua a través de las aportaciones, así mismo se dejan en blanco los valores que aparecen por defecto dentro de la ventana "Tóxicos", puesto que no se modela ningún contaminante tóxico que afecte la calidad de agua.

5.6 Simulación.

En este momento se tienen el modelo de calidad de agua completo, a falta de simular para empezar a calibrar los parámetros. Antes de simular "GESCAL" se debe simular con el módulo "SIMGES" en el mismo periodo que se va a simular la calidad. Para ello es necesario simular el módulo "SIMGES" desde el mes de octubre del año 2010 para un periodo de 6 años. Se debe llamar la atención aquí sobre la diferencia entre las simulaciones con el módulo "SIMGES" que se hace para evaluar las garantías de gestión del sistema y las simulaciones que se hacen con el módulo "GESCAL" para evaluar la calidad del recursos hídrico. Cada módulo debe ser corrido siguiendo la misma temática, después

de cada modificación que se realice en sus parámetros con el objetivo de calibrar las variables de calidad, a su vez los valores simulados por el módulo "SIMGES" debe representar concordancia con los datos observados para luego empezar a correr el módulo "GESCAL".

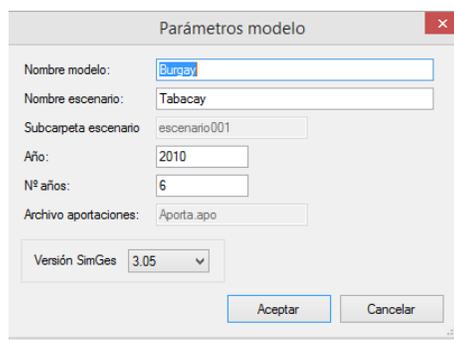


Figura 67. Simulación de "SIMGES" para el periodo en el que se disponen los datos de calidad
Fuente: Software "AQUATOOL"

Una vez que se ha realizado la simulación con la ayuda del módulo "SIMGES" para el período indicado, se corre el módulo "GESCAL". En ese momento se escriben los archivos de entrada al modelo y se hace la llamada al módulo matemático.



Figura 68. Módulo "GESCAL" en funcionamiento
Fuente: Software "AQUATOOL"

5.7 Análisis de resultados y calibración.

Una vez que se ha realizado la simulación tanto con el módulo "SIMGES" como con el módulo "GESCAL", el programa permite analizar los resultados a través de un modo "Gráfico", el cual muestra los resultados simulados por los diferentes módulos y permite una comparación con los datos observados si anteriormente se hubiese ingresado al sistema. Pudiendo así de esta manera comparar los resultados y comprobar si se obtienen resultados correctos. Por defecto las series observadas que se representan, lo hacen en

formato de puntos, lo que permite un mejor análisis de datos entre los simulados y observados.

Los resultados que arroja el modelo corresponden a la concentración al final de la conducción. El modelo estima la concentración de cada conducción en cada tramo de las quebradas para cada diferencial de cálculo y para cada mes simulado, cuyos resultados son representados mediante una herramienta que incorpora el programa "AQUATOOL" llamada "eGraf".

La herramienta "eGraf" permite editar las series gráficas, modificar el nombre de la serie, el tipo de gráfico, el tipo de línea o de punto. Además, el gráfico permite hacer zoom mediante la selección en el mismo gráfico o a través del botón correspondiente. Se puede copiar los valores numéricos al portapapeles, imprimir, guardar una imagen del gráfico, ocultar/mostrar las series representadas y eliminar la serie ya representada. En fin el uso de esta herramienta posibilita el correcto estudio de las variables de calidad simuladas.

La herramienta "eGraf" también permite analizar módulo por módulo generando un gráfico dinámico con los resultados simulados. En cuanto al módulo SIMGES esta herramienta permite el análisis de los niveles de caudales que pasan por las conducciones y en cuanto al módulo "GESCAL" permite el estudio de las variables de calidad que forman parte del modelo matemático, todos los resultados expresados a una misma escala de tiempo. Las representaciones se hacen a través de filtros como "El tipo de elemento", "Nombre elemento" y "Tipo de resultado", que nos da la opción de observar las variables que se desee analizar.

Los resultados de las simulaciones necesariamente tendrán que pasar por un proceso de calibración con el fin de representar fielmente lo que verdaderamente ocurre con los caudales y las variables de calidad que forman parte del modelo matemático. La calibración se centra en el ajuste de los parámetros de las conducciones del oxígeno disuelto, el ciclo del nitrógeno y la eutrofización y en los parámetros que intervienen en las conducciones de los constituyentes de primer orden antes expuestos.

Para realizar el proceso de calibración es necesario hacer múltiples simulaciones variando los parámetros del modelo para ver los resultados. No es necesario iniciar en cada simulación el gráfico dinámico con los nuevos resultados, basta con actualizar los resultados cada vez que se cambie algún parámetro y se realice una nueva simulación de calidad. Además, no es necesario cerrar o abrir el gestor de gráficos, cada vez que se haga una simulación y por último no hace falta simular el módulo "SIMGES" a no ser que se haya variado algún dato que modifique las variaciones de flujo en el sistema.

5.7.1 Calibración de Resultados.

La calibración es el proceso por el cual se ajustan los parámetros del modelo para que el comportamiento del mismo sea lo más parecido a la realidad. En la modelación de calidad es bastante habitual calibrar los modelos en la situación más desfavorable de los caudales, por ser una situación que presenta una dilución lenta de las concentraciones de los contaminantes presente en el cuerpo de agua. En este modelo debido a que se realiza una modelación de simulación continua, la calibración se realizará para todos los datos disponibles en los que se dan periodos secos y húmedos, pues lo que se intenta es obtener una representatividad del comportamiento del sistema en todas las situaciones.

En este momento se dispone del modelo funcionando con las entradas y datos físicos introducidos. Sin embargo para que el modelo de calidad este completo se procede a calibrar los parámetros del mismo. Este proceso se puede realizar mediante cualquier técnica matemática de ajuste de parámetros o como en este estudio mediante la visualización de los resultados medidos frente a los simulados.

En la tabla 39 se muestra los puntos de calibración de nuestro modelo matemático.

Tabla 39. Relación entre los puntos de medición, y resultados del modelo para comparación

Puntos de Calibración		
Caudales		
Estación	Modelo	A comparar
IcaLlauca_Final	IcaLlauca_Nudo Final	Caudales
IcaCon_Fianl	IcaCondor_Nudo Final	Caudales
Calidad		
Estación	Modelo	A comparar
IcaLlauca_Final	IcaLlauca_Nudo Final	Constituyentes
IcaCon_Fianl	IcaCondor_Nudo Final	Constituyentes

Fuente: Elaboración propia

Para establecer los puntos de comparativa se ha de tener en cuenta que el modelo da como resultado las concentraciones al final de cada tramo, los mismos que serán comparados en base a los datos obtenidos en las mediciones por la EMAPAL en los mismos puntos simulados, obviando los eventos puntuales que pudieron haber ocurrido dentro de las quebradas porque serían eventos difíciles de predecir para el modelo matemático, analizando solamente los datos que sigan una tendencia lógica de resultados a la misma escala de tiempo.

5.7.1.1 Constantes utilizadas.

Entre las constantes utilizadas se puede destacar:

El método Covar calcula la reaireación en función de la velocidad y la profundidad del tramo del cuerpo de agua estudiado, por medio de tres fórmulas, cada una con sus condicionantes: Owens, Churchill y O'Connor-Dobbins

-Para el cálculo de la reaireación en los tramos de las quebradas, se ha utilizado la fórmula propuesta por (Owens-Gibbs), cuya condicionante es que la profundidad del cuerpo de agua deber ser menor a 0.61 m.

$$K_{a=5.32} \frac{u^{0.67}}{H^{1.85}} \text{ Donde } u \text{ es la velocidad en m/s y } H \text{ es la profundidad.} \quad (9)$$

Ecuación 9. Fórmula de Owens-Gibbs

Fuente: (Paredes, 2004)

Al dar un valor de -1 a la constante de reaireación dentro del módulo de calidad de nuestro modelo, el programa calcula automáticamente este parámetro por medio del método Covar.

A demás, las constantes utilizadas para corregir los parámetros por la variación de la temperatura en las dos quebradas han sido los siguientes: reaireación -1 método Covar; degradación de materia orgánica 3.4; velocidad de sedimentación de la materia orgánica 0.36; constante de degradación del nitrógeno orgánico 0.2; velocidad de sedimentación del nitrógeno orgánico 0.15; constante de nitrificación del amonio 0.8 y la constante de desnitrificación de los nitratos 0.001. Estos valores junto con los volúmenes de las aportaciones se utilizaron para correr y calibrar el modelo en base a los análisis de laboratorio de las muestras de agua tomadas en el campo y a los rangos establecidos en el manual del módulo "GESCAL".

5.7.1.2 Simulaciones.

Como se explicó anteriormente para calibrar el modelo es necesario realizar muchas simulaciones en los dos módulos a utilizar, siguiendo diferentes análisis de cálculo y corrigiendo los valores de las constates utilizadas para cada variable de calidad junto con los volúmenes de las aportaciones hasta lograr que exista una correlación directa mayor a 0.7 entre los valores simulados y los valores observados proporcionados por la EMAPAL. Las simulaciones se llevaron a cabo en base a los siguientes fundamentos teóricos:

- En primera instancia se analiza el modelo en estado estacionario. (Q=cnt; T=cnt)

- Comprobar si la disminución del oxígeno disuelto que existe desde la parte alta de las quebradas hasta las captaciones es debida solamente al consumo existente por la degradación de la materia orgánica.
- Existe un solo aporte de contaminantes en forma puntual en la parte baja de las quebradas, que representa la mayor parte de la contaminación que ingresa al cuerpo hídrico a modelar.
- El 70% del flujo del caudal que llega a la captación representa el volumen de las aportaciones ubicadas en la parte alta de las quebradas, la misma que presenta bajas concentraciones de contaminación y el 30% del flujo de caudal que llega a la captación representa el volumen de las aportaciones ubicadas en la parte baja de las quebradas, las mismas que presenta altas concentraciones de contaminación.
- En primera instancia no existe demanda de oxígeno por parte del sedimento.
- El tiempo de simulación data desde el mes de octubre del año 2010 hasta el mes de septiembre del año 2016.
- Si comprobamos que el consumo de oxígeno no se da simplemente por parte de la materia orgánica el objetivo de las posteriores simulaciones serían conocer la cantidad de nitrógeno que ingresa al sistema para que exista la disminución de oxígeno que usamos para ajustar el modelo. En esta simulación se analiza el consumo de oxígeno disuelto por la presencia de materia orgánica y la nitrificación del amonio.
- Si se observa que las cargas de materia orgánica y amonio son elevadas para lograr la disminución del oxígeno disuelto y no permiten ajustar el modelo, necesariamente hay que incluir otro parámetro fundamental en el consumo de oxígeno en los cuerpos de agua y es el que ejerce el sedimento. Existe demanda de oxígeno por el sedimento.

5.7.1.3 Comparativa de los caudales.

El primer aspecto que se debe comprobar es el cuantitativo. La comparación de los caudales en las estaciones de aforo indica si el modelo responde a la realidad del sistema y a la gestión que se está realizando. Este proceso es esencial, debido a que indica como nuestro modelo responde ante los datos de las aportaciones ingresadas al sistema, conseguidas con la ayuda del programa "EvalHid".

La comparación de los valores de los caudales no se hacen con los datos medidos por la EMAPAL, porque el método de medición de caudales utilizado por esta institución es muy artesanal dando un mayor porcentaje de error al momento de la medición, sin contar con los

datos faltante o en cero de las series históricas, razón por la cual se utilizó los diferentes programas antes mencionados para conseguir valores de caudales que representen resultados más acercados a la realidad de la dinámica hidrológica de las quebradas a una misma escala de tiempo, siempre respetando los condicionamientos observados en los datos medidos en el trabajo autónomo de campo como por ejemplo que los valores de los caudales en la quebrada Llaucay son mayores a los de la quebrada Cóndor Yacu y que los valores de los caudales aumentan en las estaciones invernales que experimenta la microcuenca del río Tabacay. En base a todo esto la comparación se realizó entre los datos simulados por el módulo “SIMGES” y los datos conseguidos con el programa “EvalHid”.

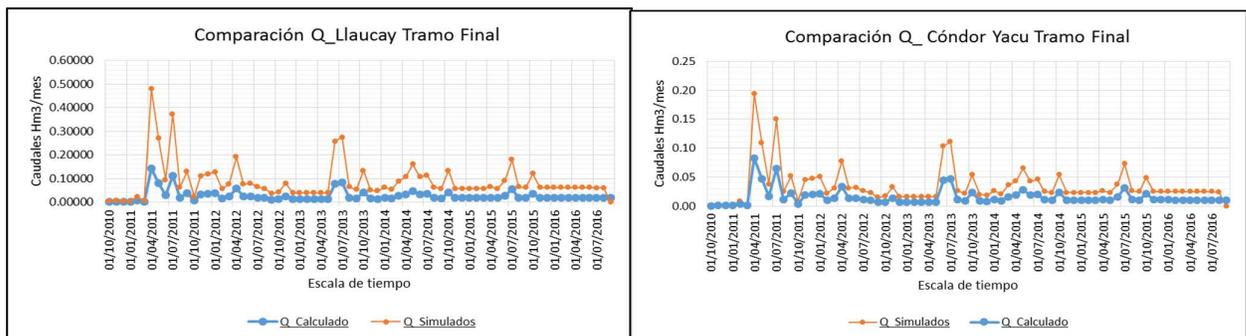


Figura 69. Comparativa de caudales en los tramos finales de las quebradas
Fuente: Elaboración propia

Al comparar la evolución de los caudales calculados con el programa “EvalHid” frente a lo estimado por el modelo se puede estimar diferencias apreciables sobre todo en las épocas invernales donde sus caudales aumentan considerablemente, ocurriendo lo contrario en las épocas de verano donde sus caudales presenta valores cercanos a nulos. Sin embargo esta comparación se puede considerar muy buena, dada la incertidumbre que se tiene sobre los verdaderos consumos históricos y la falta de exactitud en la restitución de las aportaciones naturales. A demás, se puede observar en la figura 69 que los valores de los caudales de cada quebrada siguen tendencias similares entre los datos simulados y calculados, lo que es muy bueno al momento de hacer las simulaciones con el módulo “GESCAL”, pues se obtienen valores aproximados de caudales de dilución de los contaminantes.

Aunque los caudales simulados son superiores a los caudales calculados, los mismos que deberían ser investigados. Es muy importante evitar los caudales nulos al momento de simular con el programa “SIMGES” ya que no se puede simular la calidad en ausencia de agua. Este efecto es bastante normal, pues el módulo “SIMGES” solo simula el paso del agua si este es necesario. Mientras que en muchos puntos no se establece caudales

mínimos de forma gubernamental pero no se suele gestionar dejando sin caudal los ríos. Por ello es conveniente definir un caudal mínimo en cada tramo final de las quebradas. Para aquello se puede escoger un mínimo histórico, o uno de los mínimos establecidos en estudios hidrológicos acerca de esta microcuenca. En este caso, el valor escogido es $0.001 \text{ Hm}^3/\text{mes}$ que equivale a $1000 \text{ m}^3/\text{mes}$, pues es un dato acercado a la realidad que permite llevar a cabo una correcta gestión dentro de los cuerpos hídricos a modelar.

En fin el modelo se correrá de acuerdo a los caudales simulados con el módulo "SIMGES", pues se obtuvieron volúmenes de caudales cercanos a la realidad hidrológica que presentan estas quebradas en estudio y no presentan valores nulos que podrían causar complicaciones al momento de modelar las variables de calidad con el módulo "GESCAL".

5.7.1.4 Comparativa de las concentraciones.

El siguiente paso es comparar las concentraciones de las variables de calidad como son los sólidos suspendidos, la demanda bioquímica de oxígeno, el oxígeno disuelto, el nitrógeno orgánico, el nitrógeno amoniacal y los nitratos, cuya comparativa se centrara en el análisis entre los datos de calidad medidos por la EMAPAL y los datos simulados con la ayuda del módulo "GESCAL" a una misma escala de tiempo. Aunque es conveniente realizar un análisis y una calibración completa en cada tramo de las quebradas a modelar, para este estudio simplemente se realizará una calibración en los tramos finales antes de las captaciones de cada una de las quebradas, debido a que se cuentan con datos de calidad observados solo en estos puntos de las quebradas.

El objetivo del modelo es reproducir las condiciones que se tienen observadas en la captación, teniendo en cuenta las condiciones aguas arriba hasta lograr tener los datos observados y simulados con una correlación superior al 70%.

En todas las simulaciones se considera que el agua que recorre las quebradas no presenta contaminación aguas arriba, solamente determinamos presencia de contaminantes que ingresan en un solo punto del vertido aguas abajo; es decir, se considera contaminación puntual.

Las simulaciones solo se realizan en los tramos finales de las quebradas a modelar, pues solo aquí se dispone de datos proporcionados por la EMAPAL.

Constituyentes Llaucay y Cóndor Yacu

- **Oxígeno Disuelto y Materia Orgánica**

Para la calibración de la DBO_5 se dispone de la velocidad de sedimentación, " V_{sd} ," y la constante de degradación de la materia orgánica " K_d ". Los valores de la bibliografía para la

velocidad de sedimentación se centran entre 0.01-0.36 m/d. Para la constante de degradación se encuentran valores entre 0.02 y 3.4 días⁻¹.

En cuanto al oxígeno disuelto la constante de reaireación, “K_a”, con valores entre 0 y 100. Si damos un valor de “-1” el programa lo calcula internamente utilizando el método Covar.

Se utilizaron las mismas constantes en las dos quebradas en estudio para calibrar el modelo, por ser cuerpos de agua que poseen una dinámica hidrológica muy similar según los trabajos hechos en el campo. Las constantes utilizadas para calibrar el modelo fueron V_{sd}=0.36, K_d=3.4 y la K_a= -1 método Covar.

Como se puede observar en las figuras siguientes los niveles de concentración de oxígeno disuelto simulados por medio del método Covar, tienen valores que varían entre 9 a 10 mgO₂/l a diferencia de los valores observados que presentan valores entre los 7 a 8 mgO₂/l. El ajuste del oxígeno disuelto se ha realizado teniendo en cuenta todos los procesos naturales que consumen oxígeno dentro del cuerpo de agua como la degradación de la materia orgánica, la nitrificación del amonio y la demanda de oxígeno desde el sedimento.

Luego de ajustar el oxígeno disuelto se tienen los siguientes resultados:

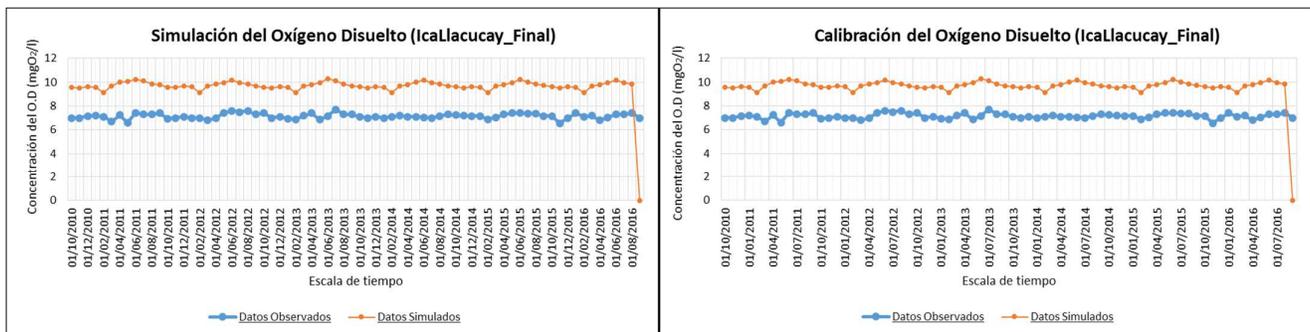


Figura 70. Comparativa de valores de oxígeno disuelto simulados y calibrados (Quebrada Llaucay)
Fuente: Elaboración propia

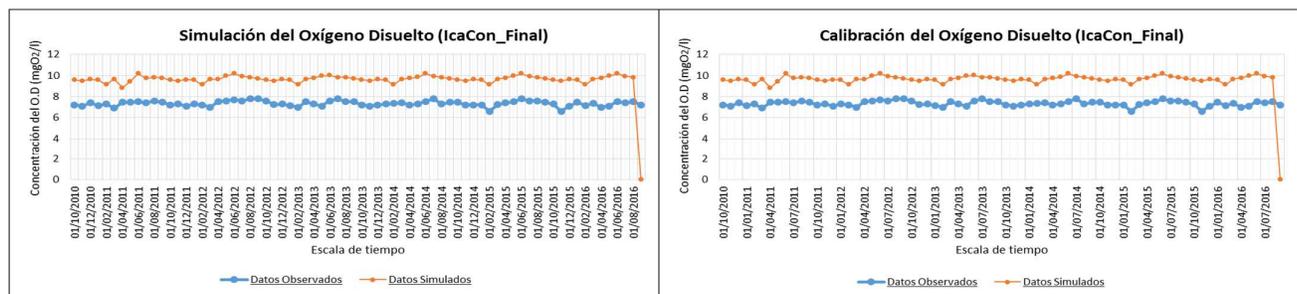


Figura 71. Comparativa de valores de oxígeno disuelto simulados y calibrados (Quebrada Cónдор Yacu)
Fuente: Elaboración propia

Para lograr el ajuste del oxígeno disuelto en el tramo de la captación se debe disminuir la concentración desde el valor de saturación hasta los datos observados que se disponen, por esto se analiza las cargas que ingresan al sistema a través de las aportaciones, especialmente por la aportación más cercana a la captación. La presencia de las variables de calidad como la materia orgánica, el amonio y sólidos suspendidos provocan la disminución del oxígeno en el sistema.

Para que exista la disminución de oxígeno desde el valor de saturación hasta el valor de la captación la carga de materia orgánica que ingresa a los cursos de agua debe tener un valor muy alto.

Al calcular las concentraciones de oxígeno disuelto por medio del método "Covar", se puede observar que las concentraciones simuladas son mayores a las concentraciones observadas, lo cual es un buen indicador de la calibración del modelo matemático, pues teniendo en cuenta factores como la presión atmosférica y la temperatura que influyen directamente sobre las concentraciones de oxígeno disuelto tendiéndolas a disminuirlas, podemos dar como correctos los valores observados que oscilan entre los 6 y 7 mgO_2/l de concentración de oxígeno disuelto.

Con las cargas de materia orgánica, amonio y sólidos suspendidos que ingresan al sistema acuático se ajusta la concentración de oxígeno disuelto que ingresa a la captación

En la figura 72 y 73 se presentan las concentraciones de materia orgánica medida como la DBO_5 en el tramo de la captación, los valores simulados y calibrados de cada quebrada se presenta en figuras distintas para una mayor apreciación de la calibración realizada.

Como se puede observar en las figuras 72 y 73 los valores simulados no presentan mucha diferencia con los datos observados es más se podría decir que siguen una misma tendencia de valores, pero existen puntos en que la diferencia de valores simulados y observados es considerable, razón por la cual se empezó a calibrar estos valores en base a las aportaciones de materia orgánica que ingresan al sistema y a las constantes que intervienen en ella, teniendo siempre en cuenta los valores de oxígeno disuelto ya calibrados. Al calibrar el modelo los coeficientes de correlación que indican la similitud entre datos observado y simulados arrojaron los siguientes resultados, que para la quebrada Llaucay su coeficiente de correlación es 0.79, mientras que para la quebrada Cóndor Yacu su coeficiente de correlación es 0.78, siendo valores aceptables de analogía de resultados.

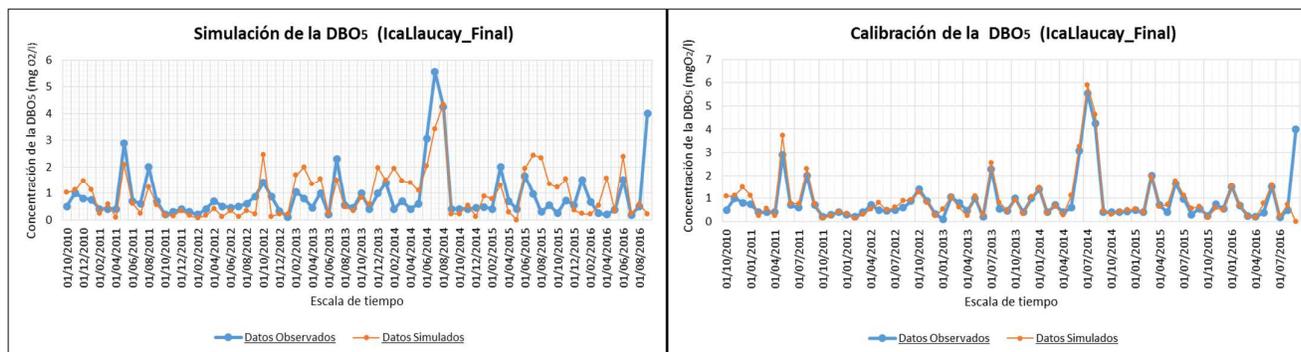


Figura 72. Comparativa de valores de DBO₅ simulados y calibrados (Quebrada Llaucay)

Fuente: Elaboración propia

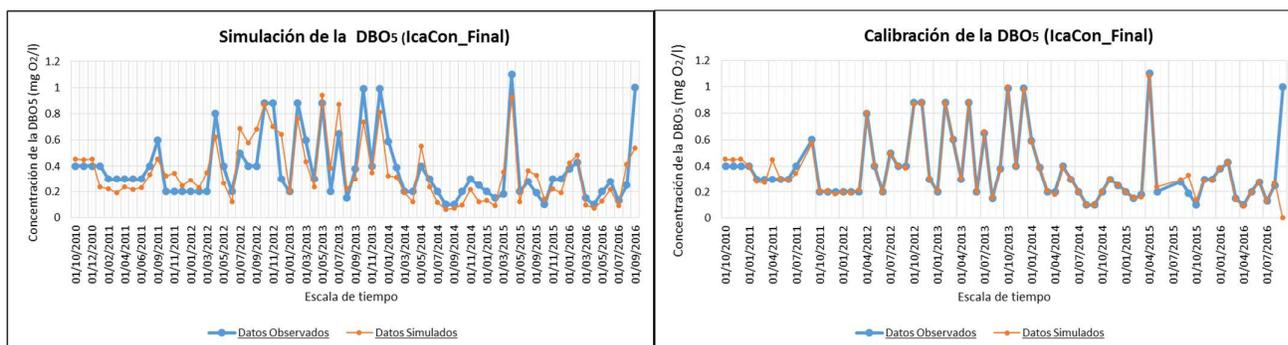


Figura 73. Comparativa de valores de la DBO₅ simulados y calibrados (Quebrada Cóndor Yacu)

Fuente: Elaboración propia

En las figuras anteriores se puede observar que la contaminación generada por la presencia de materia orgánica es mucho mayor en la quebrada Llaucay con valor promedio de $0.90 \text{ mgO}_2/\text{l}$ al mes, mientras que en la quebrada Cóndor Yacu presenta un valor promedio de $0.48 \text{ mgO}_2/\text{l}$ al mes, valores que dan a entender que la quebrada Llaucay está mayoritariamente intervenida por actividades ganaderas, agrícolas, industriales y domésticas que necesariamente necesitan ser controladas para el correcto manejo del recurso hídrico que ofrece esta quebrada.

• Nitrógeno

Una forma de darle mayor robustez al modelo es incluirle el ciclo del nitrógeno. Los vertidos provenientes de las actividades antropogénicas suelen incorporar nitrógeno orgánico, amonio y nitratos al medio natural. La nitrificación del amonio a nitritos consume oxígeno disuelto por lo que es importante su consideración.

Al existir disminución del oxígeno disuelto y ser cuerpos hídricos que reciben vertidos de agua residual urbana evidenciados en el trabajo de campo y escorrentía de suelos con usos ganaderos y agrícolas existe una posibilidad elevada de presencia de especies de

nitrógeno, por este motivo es conveniente el análisis de cada uno de los constituyentes del nitrógeno total.

En la figura 74 se muestran los procesos y constituyentes que se incluyen en la modelación del oxígeno disuelto, materia orgánica y el ciclo del nitrógeno.

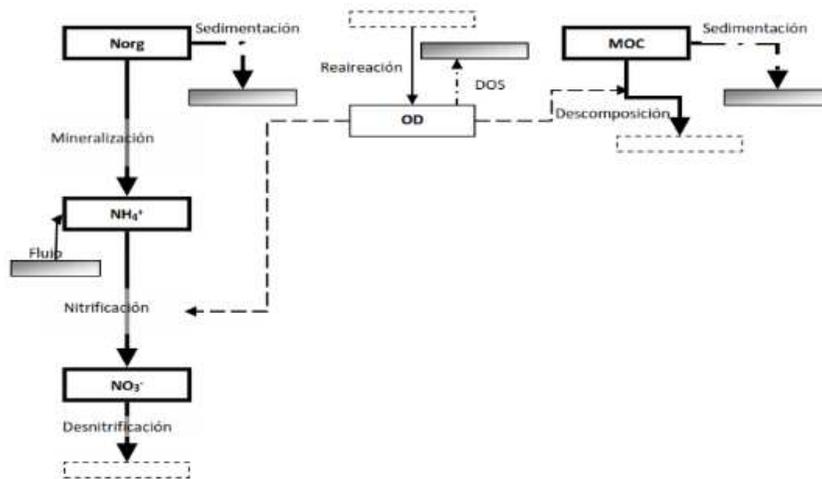


Figura 74. Procesos considerados en la modelación de oxígeno disuelto junto con el ciclo del nitrógeno

Fuente: (Paredes, 2004)

Para el ajuste de las concentraciones de nitrógeno orgánico se dispone de la velocidad de sedimentación, V_{sNorg} , y la constante de mineralización del paso a amonio, K_{Norg} . Para la velocidad de sedimentación el rango bibliográfico marca valores entre 0.001 y 0.1 m/d . En cuanto a la constante de degradación el rango usual se marca entre 0.02 y 0.4 $días^{-1}$.

El proceso de nitrificación del amonio se rige mediante una única constante, k_{nitr} , con valores entre 0.1 y 1 $días^{-1}$, y para el proceso de desnitrificación de los nitratos K_{no3} , sus valores oscilan entre los 0.001 y 0.1 $días^{-1}$.

Los valores de las constantes que intervienen en los diferentes procesos naturales del ciclo del nitrógeno, utilizados para calibrar el modelo en las dos quebradas fueron los mismos para los dos cuerpos hídricos por poseer características hidrológicas similares. Los valores fueron los siguientes: $V_{sNorg}=0.15$, $K_{Norg}=0.2$, $k_{nitr}=0.8$, y la $K_{no3}=0.001$. El valor de la constante de desnitrificación es mínimo debido a la gran oxigenación que experimentan las quebradas Llaucay y Cóndor Yacu.

Para realizar una calibración coherente hay que tener presente el ciclo del nitrógeno y como la degradación del nitrógeno aumenta las concentraciones de amonio. La degradación de este produce un consumo de oxígeno disuelto y un aumento de las concentraciones de nitratos. Además, también se tienen en cuenta que al ingresar cargas de nitrógeno orgánico, amonio y nitratos a nuestro sistema, nuestro modelo podría experimentar una

descalibración en los valores de las variables de calidad del oxígeno disuelto y la materia orgánica.

- **Nitrógeno Orgánico**

No existen datos medidos de las concentraciones de nitrógeno orgánico en las quebradas en análisis, razón por la cual se hizo una relación tomando en cuenta los valores de nitrógeno amoniacal y nitratos observados con el objetivo de conseguir resultados aproximados a las concentraciones de nitrógeno orgánico que representen la realidad de las quebradas.

Se puede apreciar en la figura 75 correspondiente a la quebrada Llaucay y en la figura 76 correspondiente a la quebrada Cóndor Yacu sus valores calibrados presentan una correlación entre los datos simulados y observados de 0.98 en la quebrada Llaucay y 0.99 en la quebrada Cóndor Yacu, siendo valores que representan bastante igualdad entre los datos simulados y los datos observados obtenidos en base a las mediciones de las variables de calidad de amonio y nitratos medidos en el campo.

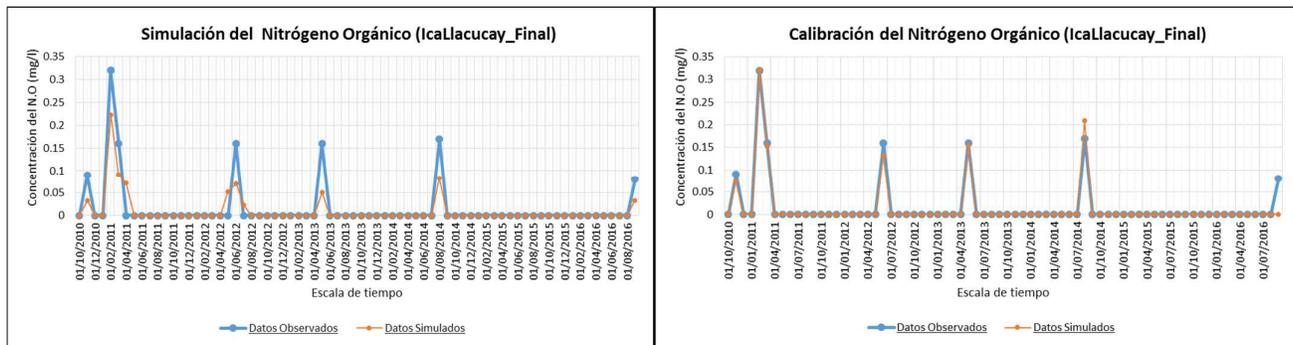


Figura 75.Comparativa de los valores del Nitrógeno Orgánico simulados y calibrados (Quebrada Llaucay)

Fuente: Elaboración propia

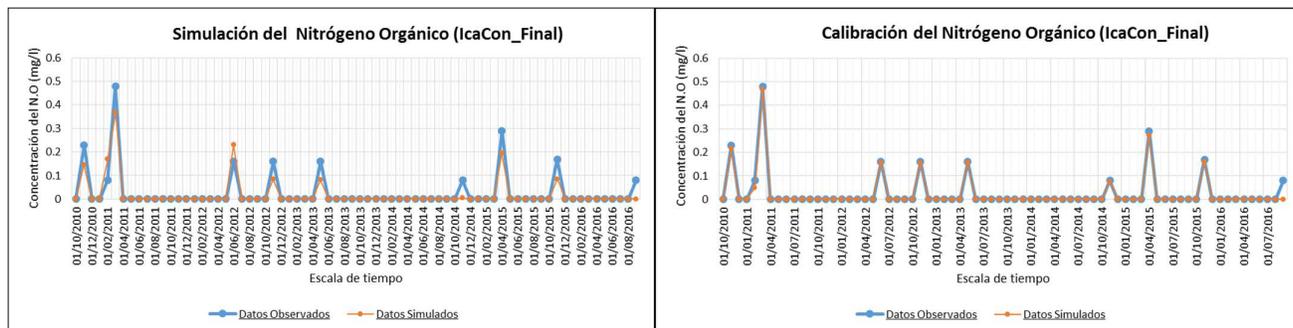


Figura 76.Comparativa de los valores del Nitrógeno Orgánico simulados y calibrados (Quebrada Cóndor Yacu).

Fuente: Elaboración propia

- **Amonio**

Los procesos considerados para la modelación del amonio han sido el incremento de la concentración por la mineralización del nitrógeno orgánico y la disminución de la misma por la nitrificación, como mencionamos anteriormente.

En la figura 77 correspondiente a la quebrada Llaucay y en la figura 78 correspondiente a la quebrada Cóndor Yacu se puede distinguir los valores de las concentraciones de amonio simuladas y observadas. En las figuras de simulación las concentraciones de los datos simulados son superiores a los datos observados en la mayoría de las fechas que arrojan resultados y por ende va a existir un mayor consumo de oxígeno, razón por la cual la calibración de esta variable de calidad se centra simplemente en las fechas que arrojan estos resultados elevados, pues en la mayor parte del periodo hidrológico simulado tenemos valores nulos en cuanto a las concentraciones de amonio dentro de las quebradas.

Las concentraciones altas de amonio que presentan las figuras coinciden con las épocas invernales que experimenta la microcuenca tanto en la parte alta como en su parte baja, por lo que se puede suponer que en estos periodos de tiempo existió un mayor arrastre de contaminantes por acción de la escorrentía superficial.

En cuanto al gráfico que presenta la calibración de los valores simulados y observados se puede decir que el coeficiente de correlación para la quebrada Llaucay es de 0.98 y para la quebrada Cóndor Yacu su coeficiente de correlación es de 0.99, dando como resultado un modelo matemático que representan aproximadamente la realidad de las quebradas en cuanto a esta variable de calidad.

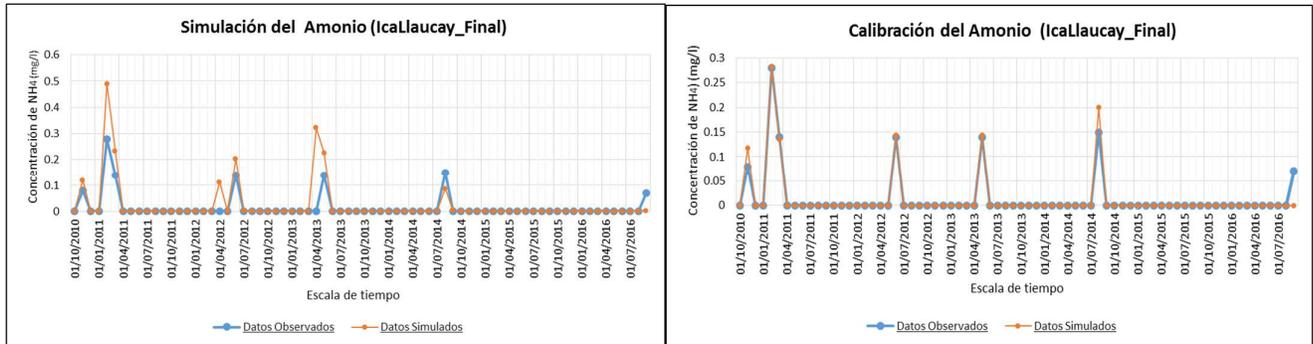


Figura 77. Comparativa de los valores del Amonio simulados y calibrados (Quebrada Llaucay)
Fuente: Elaboración propia

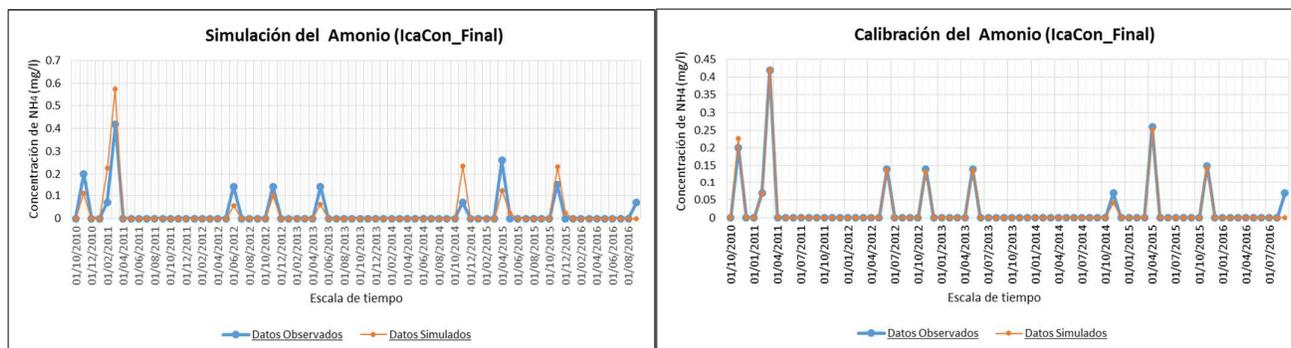


Figura 78. Comparativa de los valores del Amonio simulados y calibrados (Quebrada Cóndor Yacu)

Fuente: Elaboración propia

• Nitratos

Los nitritos y los nitratos se modelan de forma conjunta debido a la rapidez con la que los primeros se oxidan a la forma más reducida. En el proceso de modelación de los nitratos se tiene en cuenta el efecto del incremento de concentración por la transformación del amonio y la disminución de los mismos por posibles procesos de desnitrificación. Esta desnitrificación solamente se produce en condiciones anaeróbicas.

Para la simulación de los nitratos se considera cargas contaminantes inferiores a 1 mg/l en las aportaciones ubicadas en la parte alta de las quebradas, y concentraciones de nitratos superiores en las aportaciones cercanas a las captaciones. Los nitratos que aparecen en la captación según la simulación vienen por la nitrificación del amonio que se considera en la modelación.

En la figura 79 correspondiente a la quebrada Llaucay y en la figura 80 correspondiente a la quebrada Cóndor Yacu se encuentran las concentraciones de nitratos resultantes de la simulación y los datos medidos en el campo, es decir, los datos observados. Aquí se puede apreciar de acuerdo a los gráficos de simulación que los valores de los datos simulados y observados siguen una tendencia lógica de valores y no hay mucha discrepancia entre los mismos, razón por la cual la calibración se centró en corregir las aportaciones referentes a esta variable de calidad en los puntos de mayor divergencia entre los datos observados y simulados.

La figura de calibración de los valores simulados y observados presenta una correlación en la quebrada LLaucay de 0.79 y un valor de 0.96 de correlación en la quebrada Cóndor Yacu, valores que respaldan al modelo matemático y permiten con confianza llevar a cabo simulaciones de alternativas a futuro con resultados correctos que representen valores muy aproximados a la realidad de estas quebradas en cuanto a esta variable de calidad.

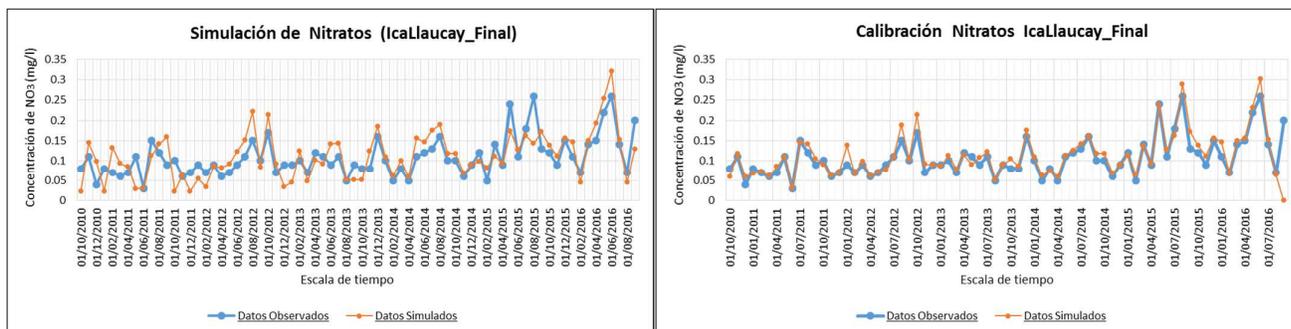


Figura 79. Comparativa de los valores de Nitratos simulados y calibrados (Quebrada Llaucay)
Fuente: Elaboración propia

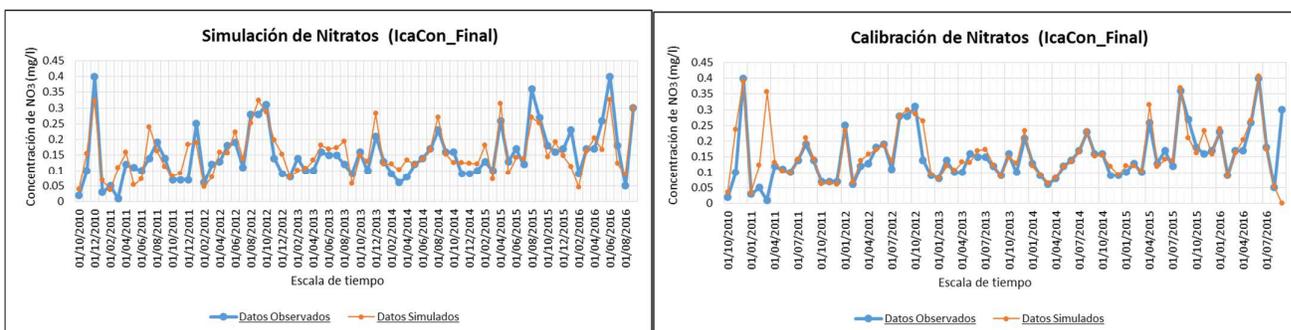


Figura 80. Comparativa de los valores de Nitratos simulados y calibrados (Quebrada Cónдор Yacu)
Fuente: Elaboración propia

• Sólidos Suspendedos

Para la calibración de los sólidos suspendidos se dispone de la velocidad de sedimentación, “Vs”, valores normales entre 0.01 y 1 m/d , todo dependerá del tipo de sólidos ya que arcillas o limos presentar valores mucho más altos de sedimentación. Se estableció un mismo valor lindante de 0.5 para las dos quebradas, que responde bien al modelo, notándose un efecto de sedimentación en la masa de agua. Al momento de hacerle un ajuste a esta variable de calidad para que los datos simulados se asemejen a los datos observados hay que tener presente que la sedimentación de los sólidos también es un proceso natural que consume oxígeno.

Una de las mayores problemáticas que afrontan las quebradas a modelar es la presencia de sólidos suspendidos causada por las diferentes actividades antropogénicas y fenómenos naturales que tienen lugar dentro de la microcuenca, pues el alto contenido de esta variable de calidad dificulta las operaciones tanto en la etapa de la captación así como en el proceso de tratamiento de estas aguas para consumo humano.

En las figuras de simulación 81 y 82 correspondientes a la quebradas Llaucay y Cóndor Yacu respectivamente, se observa que existen eventos atípicos que tienen mucha discrepancia con el resto de los valores observados, motivo por el cual es necesario tener que aumentar la concentración de los sólidos en las aportaciones con referencia a estos eventos puntuales para llegar a calibrar el modelo. A demás, se puede notar que los valores simulados y observados siguen una tendencia lógica de concentración de sólidos suspendidos permitiendo calibrar el modelo específicamente en estos eventos atípicos donde existe mucha incompatibilidad de resultados.

En las figuras de calibración se puede estimar que nuestro modelo matemático se ajusta correctamente a los datos observados en los dos sistemas hídricos modelados, teniendo en cuenta los eventos puntuales que demandan una mayor carga de sólidos suspendidos en las aportaciones. Para la quebrada Llaucay se presenta una correlación entre los datos observados y simulados con un valor de 0.97 y para la quebrada Cóndor Yacu un valor de 0.96. En fin se puede decir que nuestro modelo en base a esta variable de calidad, simula valores cercanos a la realidad de las quebradas modeladas, permitiendo hacer simulaciones de escenarios a futuro que contribuyan a la correcta gestión hidrológica de estos cuerpos de agua.

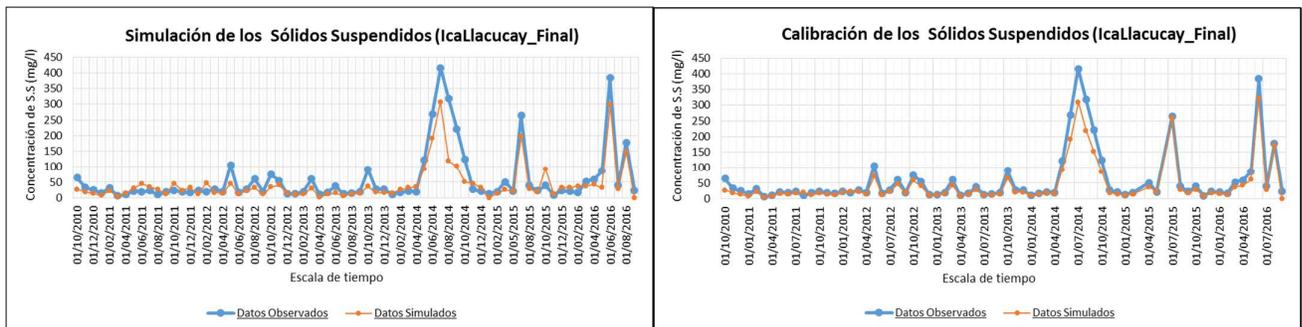


Figura 81. Comparativa de los valores de Sólidos Suspendidos simulados y calibrados (Quebrada Llaucay)

Fuente: Elaboración propia

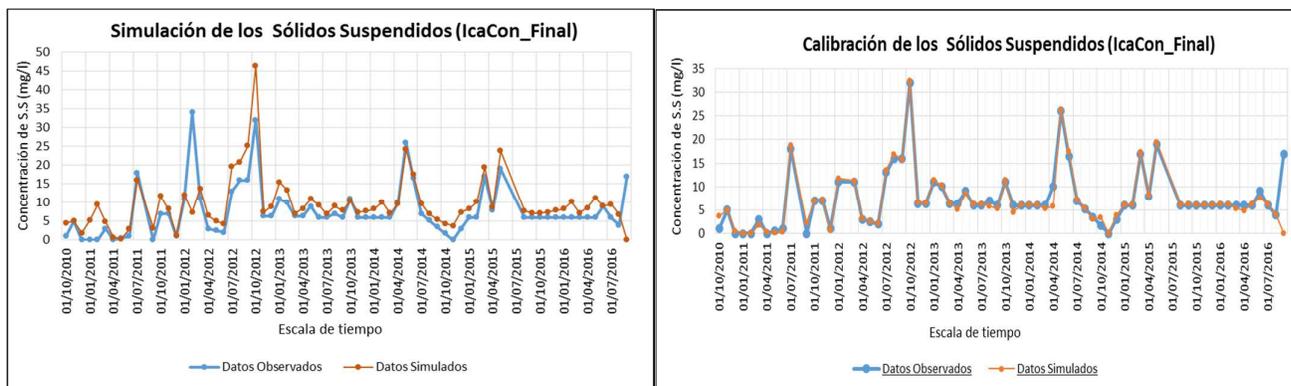


Figura 82. Comparativa de los valores de Sólidos Suspendidos simulados y calibrados (Quebrada Cóndor Yacu)
Fuente: Elaboración propia

5.8 Simular alternativas.

La simulación de escenarios permite analizar el comportamiento del sistema y de la calidad de sus aguas frente a distintas situaciones. (Paredes, 2004)

Una vez que se tiene el modelo calibrado se dispone de una herramienta para evaluar alternativas, escenarios y sus efectos tanto en la parte cuantitativa como la cualitativa. Para este estudio se planteó dos escenarios totalmente distintos y reales, el primer escenario hace relación a un sistema hidrológico totalmente degradado, donde el excesivo aumento de la población, el incremento de las actividades antropogénicas sin control alguno y los vertidos directos de aguas residuales hacia los cuerpos de agua empeoran la calidad de este recurso en las quebradas en estudio, dando como resultado un ecosistema destruido con una deficiente gestión ambiental. El segundo escenario que se planteó es un sistema hídrico con una eficiente gestión ambiental de cuidado y preservación de las fuentes hídricas que conforman la microcuenca del río Tabacay, donde las actividades antropogénicas y los vertidos directos hacia los cuerpos de agua sean controlados y gestionados para el disfrute de la población azogueña.

La simulación de los escenarios futuros se realiza en base al modelo matemático antes calibrado, variando las constantes utilizadas anteriormente para calibrar cada variable ambiental modelada y teniendo en cuenta cada evento atípico representado por nuestro modelo, con el objetivo de representar fielmente las posibilidades de que ocurran los escenarios planteados. Las modificaciones puntuales que se realizan a nuestro modelo matemático planteado son el incremento y la disminución de las concentraciones de las variables de calidad en cada una de las aportaciones, para observar cómo nuestro modelo responde a un escenario con concentraciones de las variables de calidad por encima de los

límites establecidos para fuentes naturales según el “TULSMA” y otro escenario con concentraciones de las variables de calidad por debajo de los límites establecidos para fuentes naturales.

El período de simulación data desde 10 de octubre del año 2010 hasta 09 de septiembre del año 2022. Período que representa épocas invernales y de sequía por las que cada año atraviesa la microcuenca del río Tabacay. La elección de estos doce años de simulación se debe a que por un lado se simula una época húmeda que tienen lugar en los meses de Marzo y Octubre en la parte baja de la microcuenca y en los meses de junio y julio en la parte alta y por otro lado permite analizar el sistema en una situación de sequía en los meses de Agosto y noviembre hasta febrero. Se puede considerar el período simulado como un escenario pesimista y otro escenario con gran actividad hidrológica dentro de la microcuenca.

La simulación de alternativas de escenarios futuros sirve como una herramienta de base para llevar a cabo una correcta conservación y preservación de las quebradas modeladas que conforman la microcuenca del río Tabacay, en donde se trabaje conjuntamente con la parte de gestión hidrológica y de calidad de esta microcuenca de suma importancia para la población azogueña.

El análisis de las simulaciones de los diferentes escenarios planteados se realiza desde una perspectiva conjunta “cantidad” y “calidad” de agua. El análisis cuantitativo indica la medida de utilización del recurso hídrico mientras que el análisis de la calidad de agua muestra, espacio- temporalmente, la afección de las diferentes situaciones sobre la calidad de agua.

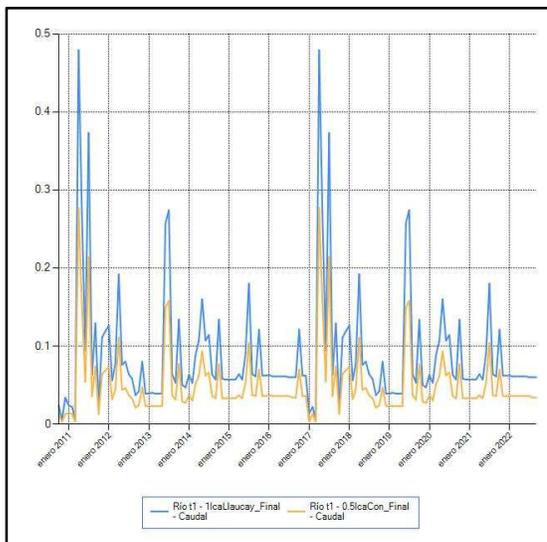


Figura 83. Comparativa de los caudales de las quebradas Llaucay y Cónдор Yacu
Fuente: Elaboración propia

Se puede apreciar en la figura 83 que las intensidades de los caudales se mantienen, siguiendo la misma tendencia de valores representada en los análisis anteriores, donde se puede observar que los valores de los caudales de la quebrada Llaucay son mayores a los de la quebrada Cóndor Yacu, a su vez la gráfica representa los puntos máximos que se generan en las épocas invernales por la que atraviesa la microcuenca.

En el período de tiempo simulado se puede ver que no existen caudales nulos que provoquen complicaciones al momento de simular el mismo ciclo con el módulo “GESCAL” referente a la calidad del sistema hídrico.

5.8.1 Escenarios de Calidad.

A continuación se presenta cada escenario planteado con su variable de calidad respectiva y su concerniente análisis en cada quebrada modelada. Es necesario tener en cuenta que los escenarios que se plantean, se simulan con los valores obtenidos en base a los datos medidos en el campo de cada una de las variables de calidad, para de esta manera evitar exageraciones de las concentraciones de estos parámetros en cada una de las aportaciones.

5.8.1.1 Oxígeno Disuelto y Materia Orgánica.

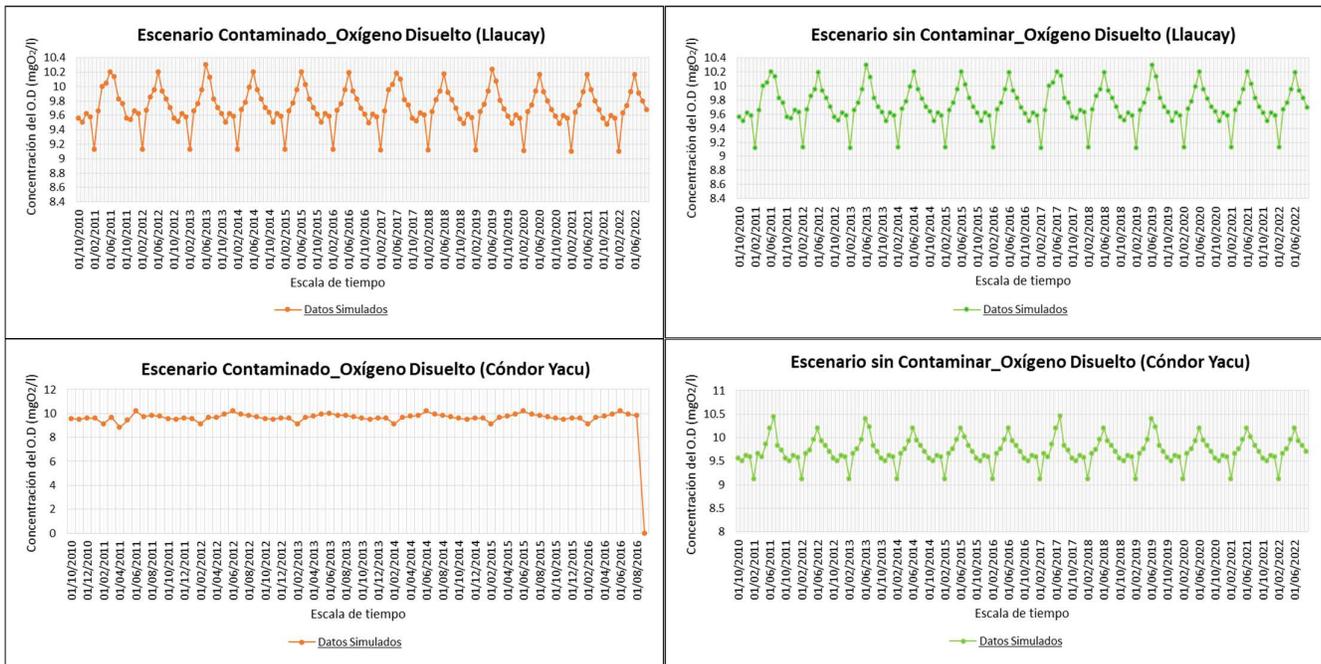


Figura 84. Escenarios_ Oxígeno Disuelto
Fuente: Elaboración propia

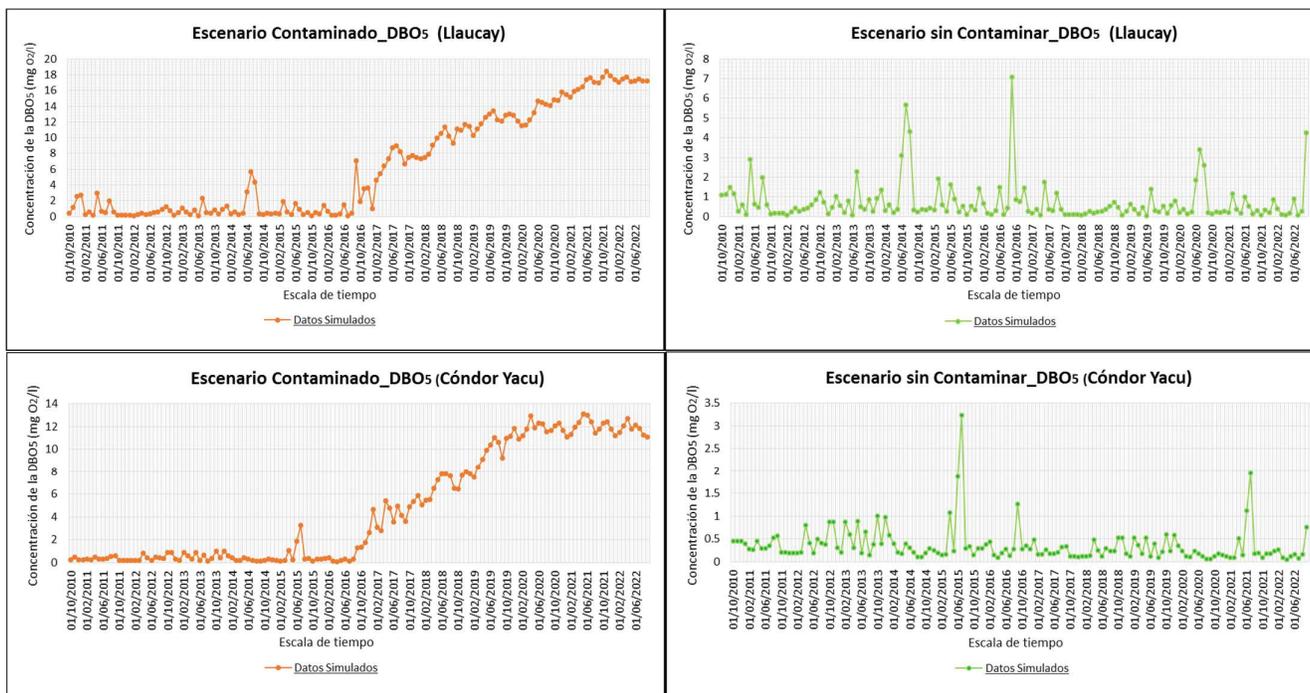


Figura 85. Escenarios_DBO₅

Fuente: Elaboración propia

Se puede observar en las figuras anteriores las concentraciones de oxígeno disuelto se mantienen entre 9 a 10 mgO_2/l de concentración, sin importar el escenario que se simule, esto se debe a que las concentraciones de esta variable de calidad se calculan mediante el método “Covar” explicado en los apartados anteriores, el mismo que relaciona la profundidad y la velocidad del sistema hídrico modelado y es independiente de las demás variables de calidad modeladas. En cuanto a las concentraciones de materia orgánica dentro de las quebradas modeladas se puede observar que el escenario contaminado para la quebrada Llaucay alcanza valores de concentración de 18 mgO_2/l , valor que representaría ya una contaminación generada por la presencia de materia orgánica y a su vez un mayor consumo de oxígeno disuelto, lo que dificultaría la vida acuática dentro de esta quebrada, mientras tanto el escenario contaminado para la quebrada Cónдор Yacu alcanza valores de concentración cercanos a los 14 mgO_2/l , valor que también representaría contaminación de origen orgánico dentro de esta quebrada.

En el escenario donde se plantea una buena gestión del recurso hídrico para las quebradas modeladas da mayoritariamente concentraciones de DBO₅ inferiores a 1 mgO_2/l obviando los eventos puntuales que representa el modelo donde subirían las cargas de este parámetro. Las concentraciones inferiores a 1 mgO_2/l representan un cuerpo hídrico óptimo para el desarrollo de la vida acuática y para el consumo humano de estas aguas que

únicamente requerirían tratamiento de desinfección de acuerdo al Libro VI del TULSMA sobre la calidad de agua

5.8.1.2 Nitrógeno Orgánico.

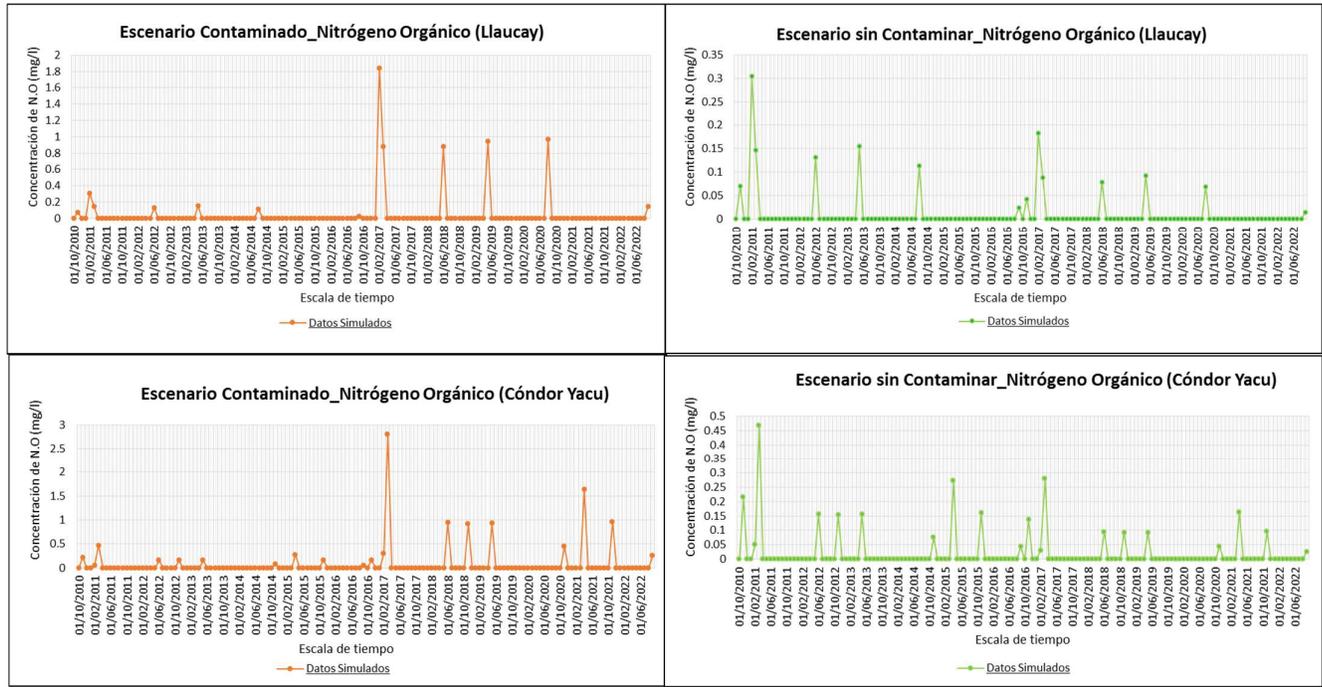


Figura 86. Escenarios Nitrógeno Orgánico
Fuente: Elaboración propia

En las figuras anteriores que representa los distintos escenarios de las concentraciones de nitrógeno orgánico, se puede apreciar que en el escenario crítico los valores de esta variable de calidad existen concentraciones inferiores a 2 mg/l , resultados que no representarían una amenaza para las quebradas modeladas ni para la vida acuática que en ellas se desarrolla peor aún afectaría al consumo humano. A pesar que se simuló con concentraciones superiores a los datos observados para generar un evento crítico dentro de los sistemas modelados no se causó un problema de contaminación en base a esta variable de calidad, lo que podría deberse a la estrecha relación que existe entre las concentraciones nitrógeno orgánico y nitrógeno amoniacal presente en el sistema.

El escenario donde se plantea una buena gestión de preservación y conservación del recurso hídrico arroja resultados de concentración de nitrógeno orgánico en las dos quebradas inferiores a los 0.5 mg/l , valor que representa la realidad de la microcuenca al comparar con los resultados obtenidos en el trabajo autónomo de campo.

5.8.1.3 Nitrógeno Amoniacal (NH_4).

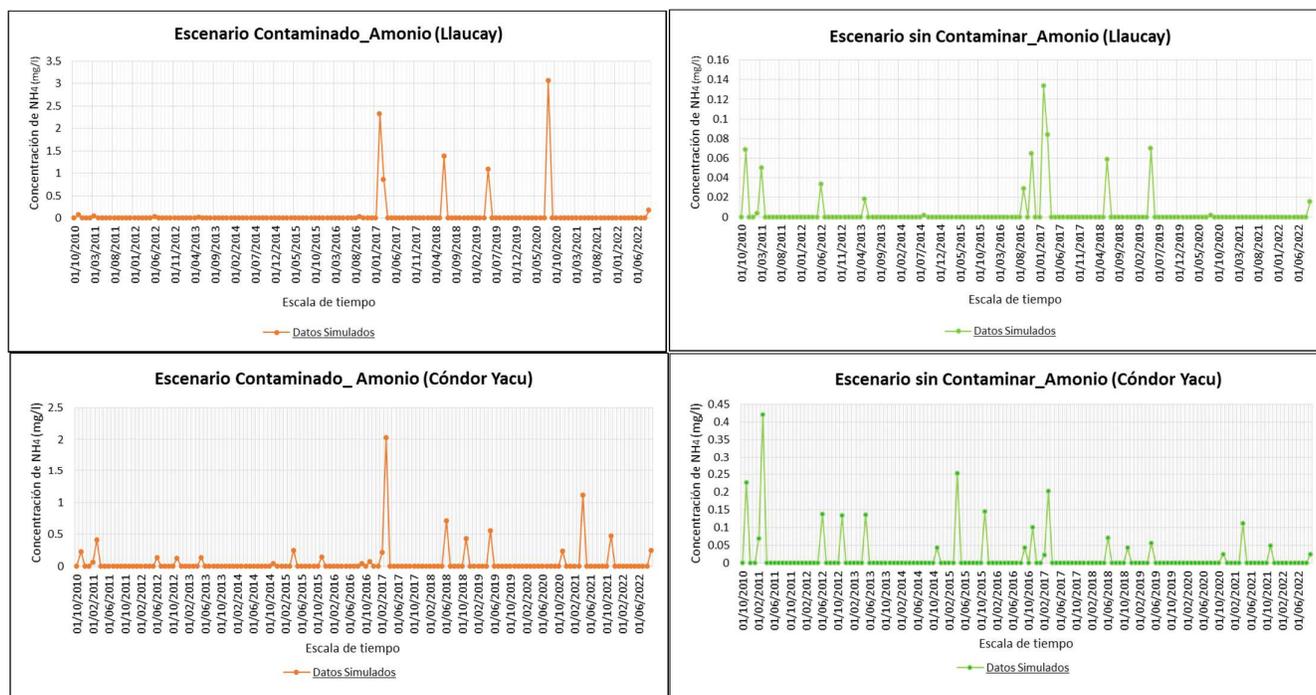


Figura 87. Escenarios Nitrógeno Amoniacal

Fuente: Elaboración propia

En las figuras antepuestas se analiza las concentraciones de nitrógeno amoniacal representadas para un escenario contaminado y otro escenario contrapuesto al primero, así mismo como en el caso del nitrógeno orgánico se puede apreciar que aunque se incrementó las concentraciones de amonio con valores superiores a los observados en cada una de las aportaciones, los resultados en el peor de los escenarios da concentraciones inferiores a los 3 mg/l , factor por el cual no se puede hablar de contaminación por concentración de esta variable de calidad ya que la bibliografía dice que un cuerpo está contaminado por amonio cuando sus concentraciones superan los 5 mg/l . Estos valores mínimos de amonio puede deberse también a la estrecha relación que existe entre la concentración de amonio con la concentración de nitratos y a su vez con la excelente dinámica hídrica que poseen estas quebradas.

Las concentraciones de nitrógeno amoniacal en el escenario donde se lleva a cabo una correcta gestión del sistema hídrico arroja valores inferiores a los 0.08 mg/l en la quebrada Llaucay e inferiores a los 0.45 mg/l en la quebrada Cónдор Yacu, datos que representarían la realidad del río Tabacay a futuro dentro de las quebradas si normarían las actividades antropogénicas como la ganadería y la agricultura que poco a poco degradan la microcuenca haciendo que el sistema hídrico pierda su capacidad autodepuración.

5.8.1.4 Nitratos (NO_3).

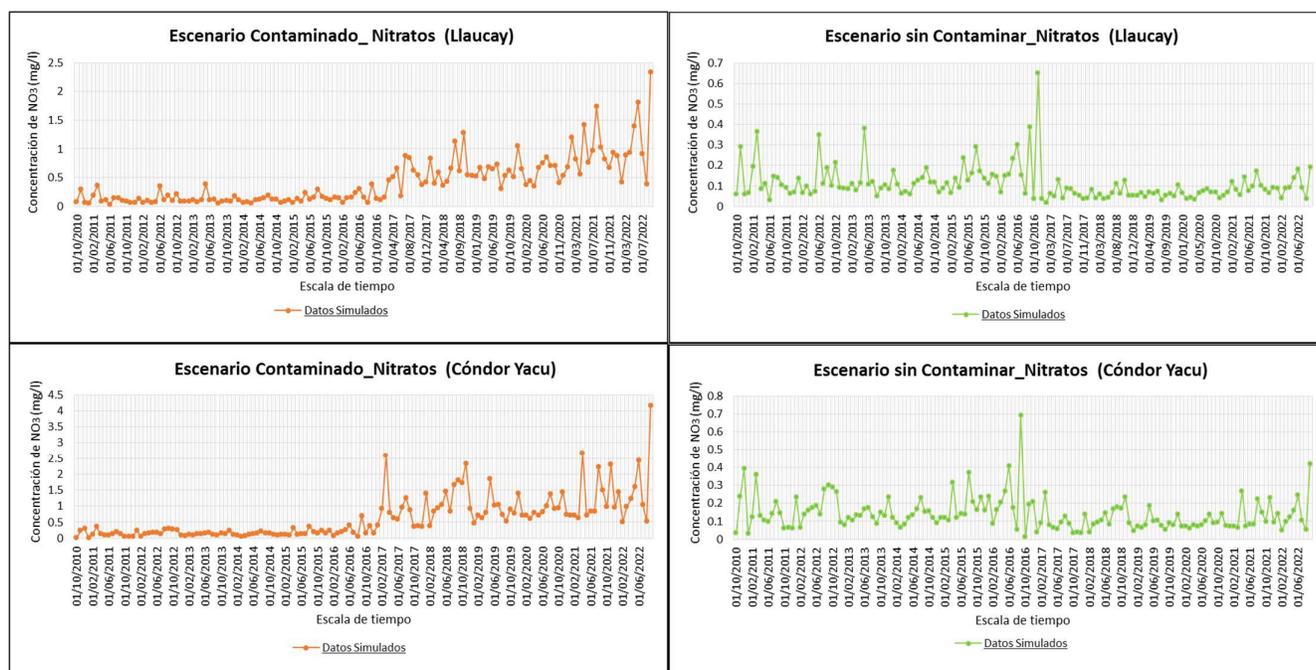


Figura 88. Escenarios Nitratos
Fuente: Elaboración propia

Las figuras anteriores representan las concentraciones de nitratos simuladas hasta el mes de septiembre del año 2022 para un escenario crítico y otro escenario contrapuesto al primero, en ellas se puede identificar que las concentraciones de nitratos no sobrepasan los 5 mg/l de concentración para ninguna de las dos quebradas modeladas. De acuerdo al TULSMA Libro VI sobre la calidad de agua para hablar de contaminación generada por nitratos sus valores deben sobrepasar los 10 mg/l , razón por la cual no existe contaminación generada por esta variable de calidad ni en el peor de los escenarios.

EL tener valores aceptables de concentraciones de los compuestos del nitrógeno total en el peor de los escenarios y valores mucho mejores en los escenarios contrapuesto, indica que en base a los datos medidos en el campo no se pueden simular alternativas confiables que representen la realidad de la microcuenca ya que al analizar estos valores no se puede hablar de contaminación generada por los compuestos del nitrógeno total.

5.8.1.5 Sólidos Suspendedos.

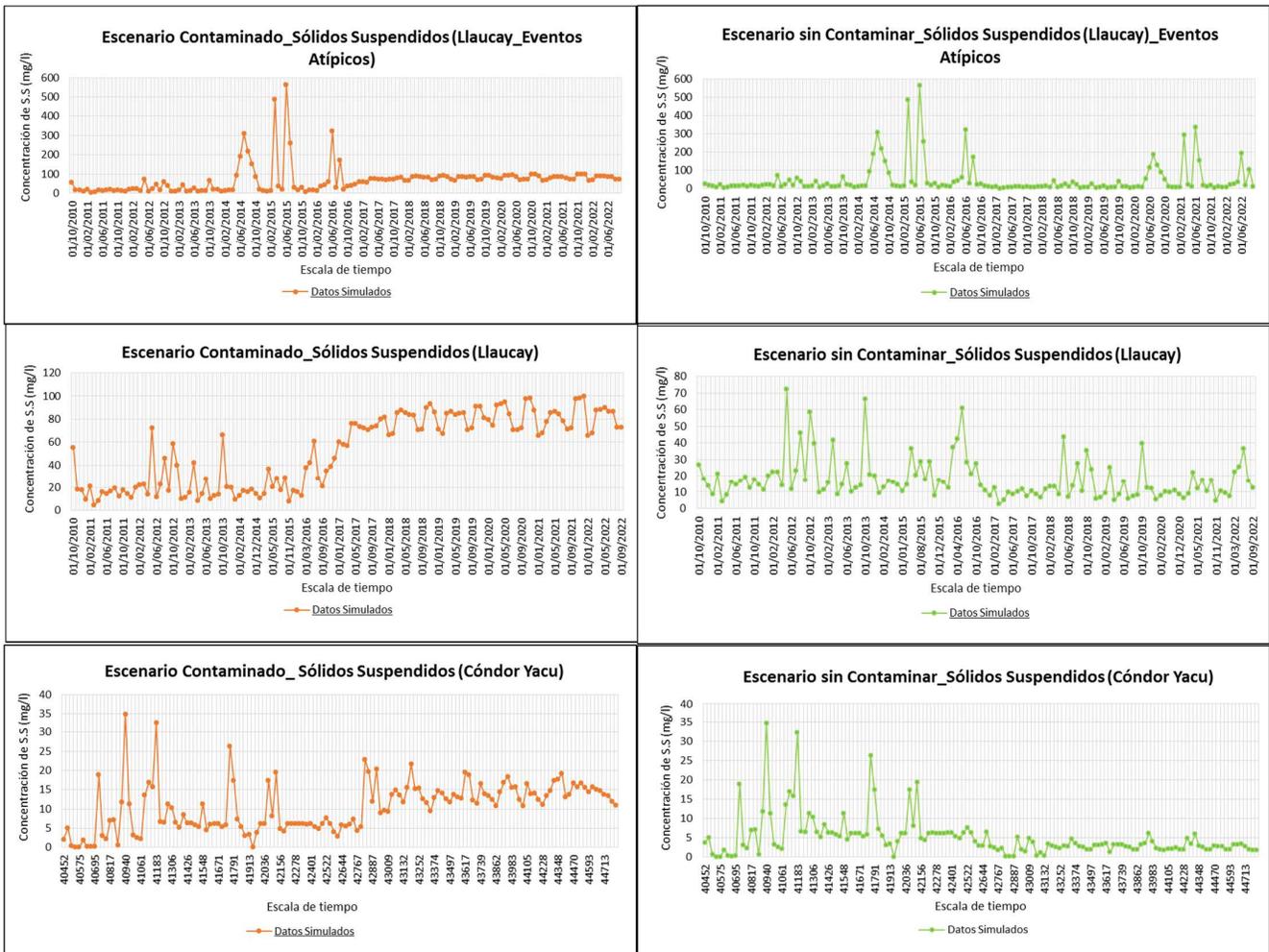


Figura 89. Escenarios Sólidos Suspendedos

Fuente: Elaboración propia

Las figuras preliminares indican las concentraciones de los sólidos suspendidos dentro de las quebradas modeladas para un escenario contaminado y otro escenario donde se lleve a cabo una correcta gestión ambiental del recurso hídrico. La legislación ambiental ecuatoriana no establece valores máximos permisibles para concentración de sólidos suspendidos en fuentes de aguas naturales, razón por la cual la regla de referencia que se utiliza es la "Directiva Marco del Agua" la misma que establece que los límites máximos permisibles para fuentes naturales de sólidos suspendidos es 35 mg/l.

Al analizar las figuras en cada una de los sistemas modelados y teniendo en cuenta los eventos atípicos que pudiesen ocurrir dentro de las quebradas se puede apreciar que la quebrada Llaucay presenta una mayor concentración de sólidos suspendidos que la quebrada Cóndor Yacu en los dos escenarios planteados, razón por la cual fue necesario

dividir la concentración de sólidos suspendidos pertenecientes a la quebrada Llaucay en dos figuras distintas para una mayor apreciación de los eventos atípicos.

En la quebrada Llaucay la concentración de sólidos suspendidos alcanza un valor máximo de 562 mg/l en uno de los eventos atípicos y valores cercanos a los 100 mg/l el resto del período simulado, dando como resultado un escenario sumamente contaminado por la presencia de los sólidos en suspensión, factor que dificultaría la transmisión del oxígeno y el paso de la radiación solar provocando la destrucción de la flora y fauna acuática del lugar.

En el siguiente escenario simulado se puede observar que las concentraciones de sólidos en suspensión disminuyen notablemente. En el evento puntual antes mencionado la concentración de esta variable de calidad disminuye a 337 mg/l y en el resto del período simulado la mayoría de los valores no sobrepasan los 35 mg/l . Estos valores podrían alcanzarse si es que se lleva a cabo una correcta gestión ambiental que involucre la conservación y preservación de esta fuente de agua natural.

En la quebrada Cóndor Yacu al analizar los resultados obtenidos de las simulaciones en cada uno de los escenarios planteados se puede apreciar que no existe contaminación generada por la presencia de sólidos en suspensión ya que se tienen valores por debajo de los 35 mg/l hasta en el peor de los escenarios.

A pesar de haber aumentado las concentraciones de cada variable de calidad en cada una de las aportaciones por encima de los límites establecidos por la legislación ambiental ecuatoriana e internacional sobre calidad de agua, se pudo observar al realizar las simulaciones en el peor de los escenarios que las concentraciones de cada una de las variables no superan los límites establecidos para hablar de contaminación, o si superan lo hacen con concentraciones demasiado bajas en relación a las cantidades de contaminante ingresado en cada aportación, factor que da a comprender la excelente autodepuración que poseen las quebradas en base a su dinámica hidrológica y calados que posee.

Al analizar cada una de las variables de calidad en cada uno de los escenarios propuestos para las quebradas en estudio, se pudo analizar que hasta ahora la capacidad de autodepuración dependiente de la reaeración de las quebradas es muy buena, lo que influye directamente sobre las concentraciones de cada variable de calidad, dando como resultado un ecosistema en buenas condiciones ambientales a pesar de las actividades antropogénicas que cada vez van ganando mayor terreno dentro de la microcuenca, razón por la cual todavía se está a tiempo para implementar un proceso de gestión ambiental de conservación y protección que involucre a entidades públicas y actores sociales dependientes de los recursos naturales que ofrece la microcuenca del río Tabacay, cuya

gestión ambiental sea eficiente con la ayuda de los modelos matemático y el establecimiento técnico de redes de monitoreo ambiental.

6. Resultados.

6.1 Conclusiones.

- Las variables de calidad medidas para la quebrada Llaucay y Cóndor Yacu se ajustan correctamente al modelo matemático diseñado, el rango de correlación entre las series simuladas y observadas es mayor al 70% (obviando los eventos puntuales) y siguen una misma tendencia lógica de resultados, características que dan la seguridad de que nuestro modelo pueda predecir condiciones futuras para realizar una gestión adecuada del recurso hídrico, a pesar de que los datos utilizados para las simulaciones son escasos por la falta de una red de monitoreo y las series históricas utilizadas representan un período corto de simulación, pero constituyen una base adecuada para que el modelo pueda ser alimentado a futuro con una gran cantidad de datos, con el objetivo de llevar a cabo mejores simulaciones más acordes a la realidad de las quebradas.
- La única variable de calidad en la que no se realizó un ajuste entre las series observadas y simuladas fue la concentración de oxígeno disuelto, ya que la misma se calculó por el método "Covar". Método que es independiente a las otras variables de calidad, pero que a pesar de esto arrojó valores entre 9 a 10 mgO_2/l que fácilmente se pueden confrontar con los valores obtenidos en el trabajo autónomo de campo. El calcular el oxígeno disuelto por medio de método "Covar", permite que las demás variables de calidad como la materia orgánica, los sólidos suspendidos y los componentes del nitrógeno total se ajusten adecuadamente a las series observadas, permitiendo a nuestro modelo tener la seguridad necesaria para predecir concentraciones futuras de cada variable de calidad modelada, sirviendo como una herramienta general de gestión ambiental que contribuya a la protección de las quebradas Llaucay y Cóndor Yacu de suma importancia para la población azogueña.
- No existe una red de calidad dentro de la microcuenca del río Tabacay que brinde información puntual de lo que en verdad sucede y en qué zona de la microcuenca ocurre. Al tener solo un punto de muestreo cerca de las captaciones se tienen simplemente una visión generalizada de la problemática, resultando complicado identificar la zona que contribuye con esta problemática y poder actuar generando modelos matemático mucho más específicos que se acerquen a la realidad de la microcuenca, sumado a esto, los datos históricos correspondientes a la estación meteorológica son muy deficientes, existiendo valores nulos o en blanco, hasta en

el peor de los casos series discontinuas de tiempo que no permiten un análisis correcto de la climatología e hidrología del lugar.

- Los datos de calidad de las captaciones tienen muchos blancos y valores nulos, incoherencias con la realidad de la zona observada en el trabajo de campo y mucha discrepancia entre los resultados de las mediciones de cada variable. Al hacer un análisis de la información entregada por la EMAPAL se puede observar que existe mucho contraste entre los resultados de las mediciones de cada variable y la realidad que enfrenta la microcuenca del río Tabacay, pues algunos valores de las mediciones indican un ecosistema en un estado de conservación muy bueno, mientras que en el trabajo de campo se evidenció la degradación constante que sufre la microcuenca a causa de las actividades antropogénicas que en ella se desarrollan.
- La materia orgánica presenta concentraciones medidas por debajo de los límites para sistemas naturales sin contaminación, situación que produce una refutación al momento de calibrar el modelo, ya que para ajustar las series simuladas a las observadas se tuvo que aumentar considerablemente las concentraciones de materia orgánica en algunas aportaciones específicas del período de simulación, la única explicación lógica que se encuentra es que los bajos niveles de concentración de materia orgánica podrían deberse a que los sistemas hídricos modelados poseen una alta capacidad de autodepuración por sus pequeños calados y grandes turbulencias. Además, al incluir a nuestro modelo los componentes del nitrógeno total, se obtuvo una visión más clara de lo que verdaderamente ocurre con estos componentes dentro de los sistemas modelados, pues sería un estudio deficiente no simular estas variables de calidad, ya que las quebradas modeladas reciben vertidos de aguas residuales urbanas y escorrentías de suelos dedicados a la agricultura y ganadería que fácilmente podrían aumentar las concentraciones de estos componentes.
- Existen datos de caudales para meses donde se produjeron precipitaciones considerables pero el flujo de agua que llega a la captación disminuye, esto debido al uso del agua para la agricultura y la ganadería, por lo que es necesario plantear un diseño justo para el reparto del recurso hídrico de una manera controlada y de esta manera garantizar en calidad y cantidad este recurso como parte de la gestión ambiental. Es evidente también que en los meses donde existe una disminución de los caudales también existe una disminución de la calidad del agua ya que la carga que ingresa al sistema es la misma pero los caudales de disolución son menores provocando un aumento en las concentraciones de cada variable de calidad.

6.2 Recomendaciones.

- Tener precaución con los procesos de toma y conservación de muestras según los parámetros que vayan a ser analizados. La adecuada toma de muestras de agua es el punto de inicio para un correcto análisis en el laboratorio, al comenzar realizando un muestreo adecuado que represente la mayor parte del cuerpo hídrico en análisis se garantiza la confiabilidad de los resultados de los procesos posteriores. La conservación de las muestras dependiendo del tipo de análisis que se vaya a realizar determina la confiabilidad que tengan los resultados esperados, es una operación que se debe llevar a cabo teniendo en cuenta todas las recomendaciones y la normativa existente. Así mismo, se debe determinar los parámetros a medir *in-situ* y realizar esas mediciones con el equipo adecuado y calibrado según los diferentes estándares de calidad de agua. Los resultados de los análisis de laboratorio ofrecen una visión de la situación y características que poseen las aguas que analizamos en el laboratorio y da una idea general de la problemática la cual hay que hacerle frente al momento de diseñar nuestro modelo.
- La frecuencia de muestreo debe ser más eficiente para evitar los valores nulos o en blanco en los parámetros puntuales. El objetivo es contar con series de datos históricos que den robustez y veracidad a nuestro modelo matemático, el mismo que debe ser capaz de predecir condiciones futuras que puedan poner en riesgo a los recursos hídricos de la microcuenca modelada. La discontinuidad de tiempo con la que se presentan ciertos datos evita que se pueda diseñar un modelo matemático que represente de forma correcta la realidad de la microcuenca.
- Tener claro el rango del contaminante que se va a medir y analizar de acuerdo al entorno en que se está tomando la muestra, es decir no se puede tomar una muestra de agua justamente bajo un vertido y esperar que su concentración de DBO5 sea inferior a los 2 *mg/l*. En la mayoría de los constituyentes analizados es posible obtener resultados con valores nulos por estar en umbrales tan bajos, lo que complicaría el uso de estos valores para el diseño del modelo ambiental.
- Verificar la concordancia entre los valores medidos de cada una de las variables de calidad modeladas, teniendo siempre presente si son suficientes estos parámetros para determinar la calidad de un sistema hídrico.
- Añadir una Red de Calidad permitirá reconocer los puntos más específicos donde se genera la problemática de la zona de estudio. Se debe implementar un sistema de control de calidad en el trayecto longitudinal de cada quebrada que conforma el río Tabacay, el mismo que permita conocer la evolución longitudinal del

contaminante. También sirve como línea base para detectar en qué punto las quebradas experimentan mayor influencia antropogénica. Las estaciones a añadir deben ser destinadas de tal manera que los datos obtenidos puedan ser utilizados en la modelación de la calidad de agua, siendo necesario que cada estación de calidad deba ser representada en un formato satelital que permita conocer exactamente su ubicación para estudios ambientales posteriores. Las estaciones de la Red de Calidad deben estar localizadas en lugares que representen características ambientales especiales de la microcuenca, con la finalidad de contar con información variada que personifique la realidad de la microcuenca. Además, se debe considerar todos los parámetros necesarios para poder llevar a cabo una modelación de calidad de agua, tales como el oxígeno disuelto, la materia orgánica, la conductividad, la temperatura, pH y parámetros más específicos como el nitrógeno y el fósforo en todas sus formas, mediciones que proporcionarán información indispensable para el correcto funcionamiento del modelo matemático.

- El establecimiento de las estaciones meteorológicas debe realizarse siguiendo procedimientos y estudios técnicos, con el propósito de obtener información correcta sobre la climatología e hidrología de la microcuenca, cuya información contribuya a estudios ambientales posteriores relacionados con la microcuenca del río Tabacay.

7. Bibliografía.

- Alberto, S. R. (2011). *CALIDAD DEL AGUA Evaluación y diagnóstico* (Primera ed., Vol. I). Medellín, Medellín, Colombia: Ediciones de la U. Recuperado el 1 de Febrero de 2017
- Alvarez, J., Solera, A., Romá, J., & Polo, J. (2015). *Modelo SIMGES de Simulación de la Gestión de Recursos Hídricos, incluyendo Utilización Conjunta*. Doctoral, Universidad Politécnica de Valencia, Gestión Ambiental, Valencia. Recuperado el 02 de Febrero de 2017, de <https://www.upv.es/aquatool/files/manuales/SIMGE2usr300.pdf>
- Andreu, J., Solera, A., Capilla, J., & Blanco, L. (2007). *Modelo SIMGES de Simulación de la Gestión de Recursos Hídricos, incluyendo Utilización Conjunta*. Universidad Politécnica de Valencia, Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia. Recuperado el 19 de Octubre de 2016
- Andreu, J., Capilla, J., & Sanchis, E. (1996). *AQUATOOL, a generalized decision-support system for water resources planning*. *Journal of Hydrology*. Recuperado el 25 de Octubre de 2016
- Brown, L. R. (2003). *Salvar el planeta*. Ciencia Ambiental y Desarrollo Sostenible. Barcelona: Internacional Thompson Editores. Recuperado el 26 de Junio de 2017, de <http://ru.iiec.unam.mx/65/1/CalidadAguaimpr.pdf>
- Buruas, N. (2001). *Water resources, unresolved issues*. *Journal of Water Resources Planning and Management*. Recuperado el 25 de Octubre de 2016
- Canada State Water Resources. (2000). *Dissolve Oxygen and Temperature*. Prospectus 3.1.1.0. Recuperado el 26 de Octubre de 2016
- Chapra, S. C. (2008). *Surface Water-Quality Modeling*. Illinois, EEUU: Waveland Press. Recuperado el 24 de Octubre de 2016
- Cueva, G. L. (2008). *GESTIÓN Y MANEJO DE LOS RECURSOS HÍDRICOS EN LA CUENCA DEL RÍO TABACAY CANTÓN AZOGUES - ECUADOR*. Tesis doctoral, Universidad de Cuenca, Facultad de Ciencias Médicas, Cuenca. Recuperado el 21 de Junio de 2017
- D, M. (1996). *Situación del agua de consumo humano y evacuación de excretas en América*. Reunión Regional sobre la Calidad del Agua Potable, CEPIS, Lima. Recuperado el 03 de Mayo de 2017
- De Zumaeta, M. A. (2004). *Manual para análisis básicos de calidad del agua bebida*. Preventivo, Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente, Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente, Lima. Recuperado el 03 de Mayo de 2017, de <http://www.cepis.ops-oms.org>
- Diputación Provincial de Alicante. (2015). *Tratamiento y Gestión de Series Temporales Hidrológicas*. Manual del Usuario, Diputación Provincial de Alicante, Gestión Ambiental, Alicante. Recuperado el Mayo de 2017, de 17

- Empresa de Agua Potable Y Alcantarillado de la ciudad de Azogues. (2003). *Plan de Manejo de la Microcuenca del Río Tabacay*. Público, EMAPAL, Gestión Ambiental, Azogues. Recuperado el 1 de Febrero de 2017, de <http://www.emapal.gob.ec/>
- Francisco, C. A. (2015). *Estimación Simultánea de datos hidrológicos anuales faltantes en múltiples sitios*. Ingeniería, Universidad Autónoma de San Luis de Potosí, Ingeniería, Investigación y Tecnología, San Luis de Potosí. Recuperado el 16 de Mayo de 2017, de <http://dx.doi.org/10.1016/j.riit.2015.03.013>
- Franco, V. V. (2007). *Estadística Descriptiva para Ingeniería Ambiental con SPSS*. Universidad Nacional de Colombia - Sede Palmira, Facultad de Ingeniería y Administración. Calí: Impresora Feriva. Recuperado el 18 de Mayo de 2017
- Ibarra, A. A. (2010). *CALIDAD DEL AGUA (Un enfoque multidisciplinario)*. UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO, INSTITUTO DE INVESTIGACIONES ECONÓMICAS. México. D.F.: UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO. Recuperado el 21 de Junio de 2017, de <http://ru.iiec.unam.mx/65/1/CalidadAguaiImpr.pdf>
- Instituto Ecuatoriano de Normalización, INEN. (2003). *ANorma Técnica Ecuatoriana: INEN 2 169: 98. Calidad del Agua. Muestreo. Manejo y conservación de muestras*. Norma Técnica de control, Instituto Ecuatoriano de Normalización, Normalización, Quito. Recuperado el 10 de Mayo de 2017
- Juárez, L. (2005). *La Vida y la Salud Como Mercancías*. Facultad de Ciencias Medicas de la Universidad de Cuenca, Centro de Estudios y Asesoría en Salud. Quito: CEAS. Recuperado el 21 de Junio de 2017, de <http://www.alames.org/index.php/documentos/libros/medicina-social/informes/60-informe-alternativo-de-la-situacion-de-salud-en-america-latina/file>
- Lozano Gómez, X. (2010). *MODELO HIDROECONÓMICO PARA EL ANÁLISIS DEL IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO. APLICACIÓN A LA CUENCA DEL RÍO SERPIS*. Trabajo fin de Máster, Universidad Politécnica de Valencia, Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente, Valencia. Recuperado el 25 de Octubre de 2016
- Martel, A. B. (s.f.). Aspectos Físico-químicos de la calidad del agua. En A. B. Martel, *Calidad del Agua* (págs. 1-55). Recuperado el 03 de Mayo de 2017
- Matovelle, B. C. (2015). *Desarrollo de un modelo de calidad de agua para la microcuenca del río Tabacay, cuenca del río Paute en la ciudad de Azogues. Ecuador*. Tesis de máster, Universidad Politécnica de Valencia, Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente, Valencia. Recuperado el 18 de Octubre de 2016, de <https://riunet.upv.es/handle/10251/66443>
- Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, Valladolid-España. (s.f.). *Plan hidrológico de la parte española de la demarcación hidrográfica del Duero*. Planificación Hidrológica, Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, Oficina de Planificación Hidrológica, Valladolid. Recuperado el 25 de Octubre de 2016

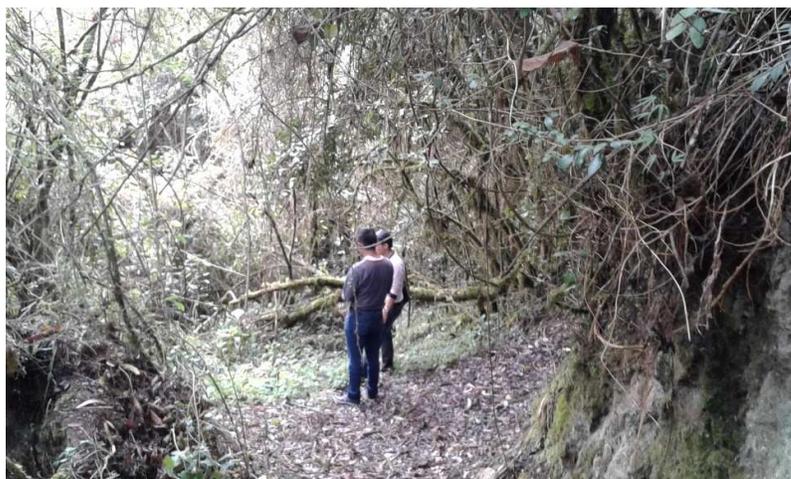
- Monerri, M. M., & Doménech, P. M. (2002). *MODELACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA*. VALENCIA, España. Recuperado el 24 de Octubre de 2016
- Paredes, J. A., Solera Solera, A., Andreu Álvarez, J., & Lerma Elvira, N. (2014). *Herramienta EvalHid para la evaluación de recursos hídricos*. Manual Técnico, Universidad Politécnica de Valencia, Grupo de Ingeniería de Recursos Hídricos, Valencia. Recuperado el 2018 de Mayo de 2017
- Paredes, J. A. (2004). *Integración de la Modelación de la Calidad del Agua en un sistema de ayuda a la decisión para la gestión de recursos hídricos*. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Valencia, Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente, Valencia. Recuperado el 18 de Octubre de 2016, de <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/1895/tesisUPV2190.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Piza, P. (1996). *Los sistemas ambientales. Un abordaje teórico para el estudio de la vigilancia*. OMS, OMS_Fundación W. K.Kellog. Recuperado el 03 de Mayo de 2017
- Sandra L. Postel and Barton H. Thompson, J. (2005). *Watershed protection: Capturing the benefits*. Forum, Natural Resources Forum, Natural Resources Forum. Recuperado el 26 de 06 de 2017, de <http://www.carpediemwest.org/wp-content/uploads/Watershed-protect-2005.pdf>
- Solera, A. (2003). *Herramientas y métodos para la ayuda a la decisión en la gestión sistemática de recursos hídricos. Aplicación a las cuencas de los ríos Tajo y Júcar*. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Valencia, Ingeniería Hidráulica y medio ambiente, Valencia. Recuperado el 25 de Octubre de 2016
- Valencia, U. P. (2005). *Aquatool*. Recuperado el 18 de Octubre de 2016, de http://www.upv.es/aquatool/es/software_es.html:
http://www.upv.es/aquatool/es/software_es.html

8. Anexos.

Anexo 1. Evidencia de las salidas de campo.



Entrada a la quebrada Llaucay perteneciente a la microcuenca del río Tabacay del cantón Azogues.



Observación de las condiciones ambientales en la quebrada Llaucay.

Anexo 2. Toma de muestras de agua para análisis de las variables de calidad.



Toma de muestras de agua para análisis de laboratorio, en el sector de la captación de la quebrada Cóndor Yacu.



Toma de la temperatura del cuerpo de agua dentro de la captación de la quebrada de Cóndor Yacu.

Anexo 3.Solicitud de petición de datos hidrológicos referentes a la microcuenca del río Tabacay dirigido a "SENAGUA".

Cuenca, 22 de Febrero del 2017

Abogado

Esteban León Aguilar

Subsecretario de la demarcación Hidrográfica Santiago

De mi consideración:

Yo Néstor Israel Cedillo Morales estudiante de la Universidad Católica de Cuenca, facultad de Ingeniería Ambiental me dirijo a usted con un atento y cordial saludo con la finalidad de solicitar la autorización para la entrega de información en formato digital (shapes, mdt, raster, ortofotos y pdf) de la microcuenca del río Tabacay de las siguientes temáticas: a)autorización del uso y aprovechamiento del agua, b) Geología de la zona, c) Hidrogeología, d) usos de suelos, e) Historial de datos meteorológicos de la zona, f) Historial de datos de calidad y caudal de agua de la microcuenca del río Tabacay, g)centros poblados, carreteras, fuentes hídricas, escuelas, bosques protegidos, puntos de monitoreo. Los datos serán utilizados para el desarrollo de un trabajo de investigación sobre la correcta gestión de la microcuenca del río Tabacay.

Atentamente



Néstor Israel Cedillo Morales

nestorisrael1991@hotmail.com

Número de celular: 0984577999

C.I. 0105598999

SECRETARIA NACIONAL DEL AGUA
DEMARCAACION HIDROGRAFICA
DE SANTIAGO
ARCHIVO
RECIBIDO: Caty Vanezas
FECHA: 22/02/2017 HORA: 14:23
CEDULA: _____ TELF: _____
FIRMA RESPONSABLE

Anexo 4. Formato de la cadena de custodia para la toma de muestras de agua.

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA REGISTRO DE CADENA DE CUSTODIA																															
PROYECTO																															
MODELACIÓN DE LA CALIDAD DE AGUA EN LA MICROCUENCA DEL RÍO TABACAY																															
PROVINCIA: Cañar																															
CANTÓN: Azuques																															
TIPO DE MODELACIÓN: Ambiental																															
RESPONSABLE: Néstor Israel Cedillo Morales																															
SOLICITANTE: Néstor Israel Cedillo Morales																															
DIRECCIÓN: Monay-Rayoloma																															
TELÉFONO/CELULAR: 0984577999																															
CÓDIGO	FECHA	COORDENADAS		ALTURA m. s. n. m.	HORA		QUEBRADA	CONDICIONES CLIMÁTICAS	TIPO DE ENVASE (V, P, VA, E)	PARÁMETROS IN-SITU		Datos a analizar en el laboratorio																			
		X	Y		Tomada muestra	Entrega al laboratorio				pH	TEMPERATURA (°C)																				
ICA_1	08/09/2016	743610	9702547	2879	13:12 PM	16H30	Uaucay	Cielo nublado, bajas temperaturas del cuerpo de agua	V,A,P	8.1	11	O.D x DBO5 x																			
ICA_2	08/09/2016	743763	9702507	2894	14:30PM	16H30	Uaucay	Cielo nublado, bajas temperaturas del cuerpo de agua	V,A,P	7.96	13	S.S x Nitratos x																			
ICA_3	08/09/2016	743980	9702149	2940	14:45PM	16H30	Uaucay	Cielo nublado, bajas temperaturas del cuerpo de agua	V,A,P	7.93	13	Datos tomados in-situ Temperatura x pH x																			
<table border="1"> <tr> <td>Tipo de envase</td> <td>V: Vidrio</td> <td>P: Plástico</td> <td>VA: Vidrio ámbar</td> <td>E: Estéril</td> </tr> <tr> <td>NOMBRE DEL MUESTRADOR</td> <td></td> <td></td> <td>NOMBRE DEL TRANSPORTADOR</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Néstor Israel Cedillo Morales</td> <td></td> <td></td> <td>Néstor Israel Cedillo Morales</td> <td></td> </tr> <tr> <td>FIRMA</td> <td></td> <td></td> <td>FIRMA</td> <td></td> </tr> </table>												Tipo de envase	V: Vidrio	P: Plástico	VA: Vidrio ámbar	E: Estéril	NOMBRE DEL MUESTRADOR			NOMBRE DEL TRANSPORTADOR		Néstor Israel Cedillo Morales			Néstor Israel Cedillo Morales		FIRMA			FIRMA	
Tipo de envase	V: Vidrio	P: Plástico	VA: Vidrio ámbar	E: Estéril																											
NOMBRE DEL MUESTRADOR			NOMBRE DEL TRANSPORTADOR																												
Néstor Israel Cedillo Morales			Néstor Israel Cedillo Morales																												
FIRMA			FIRMA																												
<table border="1"> <tr> <td>NOMBRE RECEPCIÓN LABORATORIO</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Ing. Carlos Matovelle</td> <td></td> </tr> <tr> <td>FIRMA</td> <td></td> </tr> </table>												NOMBRE RECEPCIÓN LABORATORIO		Ing. Carlos Matovelle		FIRMA															
NOMBRE RECEPCIÓN LABORATORIO																															
Ing. Carlos Matovelle																															
FIRMA																															

Anexo 5. Formato de registro de salidas de campo.

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA
REGISTRO DE SALIDAS
PROYECTO

MODELACIÓN DE LA CALIDAD DE AGUA EN LA QUEBRADA LAUCAY PERTENECIENTE A LA MICROCUENCA DEL RÍO TABACAY

NOMBRES Y APELLIDOS: Méstor Escobar Rosales

FACULTAD: Ingeniería Ambiental

CARRERA: Ing. Ambiental

TIPO DE MODELACIÓN: Ambiental
HOJA: 1

FECHA	IDRA	SALIDA	FIRMA	SEGMENTO	COORDINADAS		OBSERVACIONES Y ÁREAS REALIZADAS
					X	Y	
08/05/2016	SH00M	<i>[Signature]</i>	<i>[Signature]</i>	ICNS	014360	05702547	Temas de muestras de agua y Observación
15/11/2016	SH00M	<i>[Signature]</i>	<i>[Signature]</i>	ICNS	014360	05702547	Temas de muestras de agua y Observación
17/12/2016	SH00M	<i>[Signature]</i>	<i>[Signature]</i>	ICNS	014360	05702547	Temas de muestras de agua y Observación
17/02/2017	SH15M	<i>[Signature]</i>	<i>[Signature]</i>	ICNS	014360	05702547	Temas de muestras de agua y Obs.

Anexo 6. Formato de registro de medición de los caudales.

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA									
REGISTRO PARA LA MEDICIÓN DE CAUDALES									
PROYECTO									
MODELACIÓN DE LA CAUDALIDAD DE AGUA EN LA MICROCUENCA DEL RÍO TABACAY									
RESPONSABLE: Néstor Israel Cedillo Morales									
TRAMO: ICA_1									
DIRECCIÓN: Monay-Rayoloma									
TELÉFONO/CELULAR: 0984577999									
PROVINCIA: Cañar									
CANTÓN: Azogues									
QUEBRADA: Ilaucay									
FECHA: 17/02/2017									
TIPO DE MODELACIÓN: Ambiental									
Coordenadas X: 748606									
Y: 9702541									
Longitud Tramo del flotador	3	metros							
Ancho del río	1.8	metros							
Tiempos y Velocidad									
T1		5.71	segundos	Y1	0	centímetros	Área Sección	0.3384	m ²
T2		5.36	segundos	Y2	36	centímetros	Caudal	0.175579384	m ³ /s
T3		6.23	segundos	Y3	34	centímetros	Coefficiente Rugosidad	0.9	8 = Suelos rugosos ; 0.9 = Suelos lisos
T4		5.98	segundos	Y4	24	centímetros	Caudal Total	0.158021446	m ³ /s
T5		5.63	segundos	Y5	0	centímetros		158.0214459	l/s
Promedio Tiempo		5.782	segundos	Promedio Y	18.8	centímetros			
Velocidad Promedio Flotador		0.51885161	m/s	Perfil de la sección	Transversal del río				

Anexo 7. Formatos Digital.