



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIAPAS

FACULTAD DE INGENIERÍA
CAMPUS I

COORDINACIÓN DE INVESTIGACIÓN Y POSTGRADO

“ESTUDIO DE FACTIBILIDAD PARA LA EJECUCIÓN DE AFOROS MEDIANTE EL USO DE UN EQUIPO NO INTRUSIVO”

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA
CON FORMACIÓN EN
HIDRÁULICA

PRESENTA:

CARLOS ANDRÉS MORALES RAMÍREZ

DIRECTOR DE TESIS:

DR. MIGUEL ÁNGEL AGUILAR SUÁREZ



TUXTLA GUTIÉRREZ, CHIAPAS, AGOSTO 2018

Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.
04 de mayo de 2018.
OFICIO No. F.I.01.400/18.

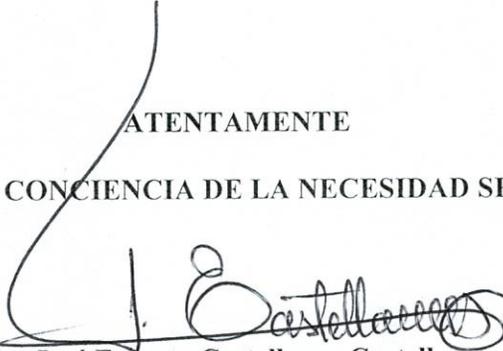
Ing. Carlos Andrés Morales Ramírez
Alumno de la Maestría en Ingeniería
con Formación en Hidráulica
Universidad Autónoma de Chiapas
Presente:

Por este medio comunico a usted, que le autoriza la impresión de su trabajo de tesis denominado:
“*Estudio de factibilidad para la ejecución de aforos mediante el uso de un equipo no intrusivo*”
para que pueda continuar con los trámites de titulación para la obtención del grado.

Sin otro particular, reciba un cordial saludo.

ATENTAMENTE

“POR LA CONCIENCIA DE LA NECESIDAD SERVIR”



Dr. José Ernesto Castellanos Castellanos
Director



C.c.p. Dr. Juan José Cruz Solís. Coordinador de Investigación y Posgrado. Facultad de Ingeniería.
C.c.p. Archivo/minutario
JJCS/amj*



Tuxtla Gutiérrez, Chiapas a 3 de abril de 2018.

DR. JOSÉ ERNESTO CASTELLANOS CASTELLANOS
DIRECTOR DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIAPAS
P R E S E N T E

Por este medio me permito informarle a usted que he concluido con la dirección de la tesis titulada **“ESTUDIO DE FACTIBILIDAD PARA LA EJECUCIÓN DE AFOROS MEDIANTE EL USO DE UN EQUIPO NO INTRUSIVO”**, que para obtener el grado de **Maestro en Ingeniería con formación en Hidráulica**, fue desarrollada por el **Ing. Carlos Andrés Morales Ramírez**, por lo que doy mi voto aprobatorio para que pueda seguir con los trámites correspondientes.

Sin otro particular reciba un cordial saludo.

Atentamente



Dr. Miguel Ángel Aguilar Suárez
Director de la Tesis

c.c.p. Dr. Juan José Cruz Solís, Coordinador de Investigación y Postgrado. Facultad de Ingeniería.
c.c.p. Archivo / Minutario.

Tuxtla Gutiérrez, Chiapas a 3 de abril de 2018.

DR. JOSÉ ERNESTO CASTELLANOS CASTELLANOS
DIRECTOR DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIAPAS
P R E S E N T E

En nuestra calidad de sinodales del Examen de Grado de Maestría en Ingeniería con Formación en Hidráulica del **Ing. Carlos Andrés Morales Ramírez**, nos permitimos manifestarle la aceptación del trabajo de tesis titulada: "ESTUDIO DE FACTIBILIDAD PARA LA EJECUCIÓN DE AFOROS MEDIANTE EL USO DE UN EQUIPO NO INTRUSIVO".

Quedamos enterados de que formaremos parte del jurado del examen de grado, en la fecha y hora que se nos comunicará posteriormente.

Atentamente


Dr. Miguel Ángel Aguilar Suárez
Director de la Tesis

Atentamente


Dra. Delva del Rocío Guichard Romero
Asesor de tesis

Atentamente


M.I. Juan José Muciño Porras
Asesor de tesis



AGRADECIMIENTOS Y DEDICATORIAS.

El presente trabajo no podría haberse desarrollado sin la Asesoría y apoyo de mi Asesor de Tesis, Dr. Miguel ángel Aguilar Suárez y los sinodales Dra. Delva del Rocía Guichard Romero y M.I. Juan José Muciño Porras.

Mencionar también a mis profesores de la Maestría en Ingeniería de la Universidad Autónoma de Chiapas, quienes manifestaron siempre profesionalismo, conocimiento de los temas y un alto espíritu de vocación para transmitir sus conocimientos.

Agradezco también a mi familia, por el apoyo y paciencia en el tiempo dedicado para alcanzar este logro, y a todos mis amigos y compañeros que de muchas formas estuvieron conmigo con sus consejos y de quienes me llevo grandes enseñanzas.



ÍNDICE GENERAL

Contenido

AGRADECIMIENTOS Y DEDICATORIAS.....	2
ÍNDICE GENERAL.....	3
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	5
ÍNDICE DE TABLAS.....	7
ÍNDICE DE GRÁFICAS.....	10
RESUMEN.....	11
1.0 INTRODUCCIÓN.....	13
1.1 Medición de caudal.....	13
1.2 Medición de caudales en Chiapas.....	13
2.0 JUSTIFICACIÓN.....	16
3.0 OBJETIVOS.....	23
3.1 OBJETIVO GENERAL.....	23
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	23
4.0 HIPOTESIS.....	24
5.0 MARCO CONCEPTUAL.....	25
5.1 MEDICIÓN E INSTRUMENTACIÓN EN HIDRÁULICA FLUVIAL.....	27
5.2 MÉTODO SECCIÓN VELOCIDAD.....	33
5.2.1 FUERZAS QUE ACTUAN EN UNA SECCIÓN.....	35
5.3 NORMA ISO-748:2007 (ISO748:2007, 2007).....	43
5.4 INCERTIDUMBRES EN LA MEDICIÓN DE FLUJO EN CORRIENTES.....	46
5.5 EQUIPOS UTILIZADOS PARA MEDICIÓN DE VELOCIDAD DEL AGUA.....	49
5.5.1 Sensores electromecánicos.....	52
5.5.2 Sensores ultrasónicos y electromagnéticos.....	56
5.6 Sensor de medición de velocidad superficial por radar no intrusivo.....	57
5.6.1 Sensores de velocidad superficial del agua.....	60
5.6.2 Características del SOMMER RG-30.....	61
5.7 Relación escala-gasto.....	62
6. MARCO DE REFERENCIA.....	65



6.1 Tipo de Investigación.....	65
6.2 Localización Zona de Estudio.	65
6.3 Equipo utilizado en las mediciones.....	67
6.4 Descripción y configuración del SOMMER RG-30 en las mediciones.....	68
7. CÁLCULOS Y PROCEDIMIENTOS	73
7.1 Protocolo de Pruebas.....	73
7.2 Análisis de error relativo por aforo.....	76
7.3 Análisis de diferencia de velocidades medias por sección.....	77
8. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	79
9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	81
ANEXO 1 AFOROS REALIZADOS CON SENSOR DE VELOCIDAD SUPERFICIAL SOMMER RG-30	83
ANEXO 2 AFOROS REALIZADOS CON MOLINETE PRICE.....	103
ANEXO 3 AFOROS REALIZADOS CON PERFILADOR ACÚSTICO DOPPLER.....	123
ANEXO 4 RELACIÓN DE VELOCIDADES MEDIDAS CON MOLINETE PRICE Y SENSOR DE VELOCIDAD SUPERFICIAL SOMMER RG-30.....	124
ANEXO 5. PRINCIPIO DE OPERACIÓN DE UN VEHÍCULO AÉREO NO TRIPULADO.....	144
PRINCIPIO DE OPERACIÓN DE UN VEHÍCULO AEREO NO TRIPULADO.....	144
AERODINÁMICA.....	151
SISTEMAS DE CONTROL.....	157
ANEXO 6 NORMATIVIDAD PARA EL USO DE UNA AERONAVE NO TRIPULADA.....	162
CITAS Y REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	167

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Estación Hidrométrica Automática Peñitas.....	17
Ilustración 2. Distribución de datos Niveles-Gastos.....	18
Ilustración 3. Curva ajustada a la distribución de datos Nivel-Gasto.....	20
Ilustración 4. Método volumétrico.	28
Ilustración 5. Aplicación del método volumétrico en un muestreo para análisis de calidad del agua.	28
Ilustración 6. Aforador de garganta larga.	31
Ilustración 7. Ejemplo aforador Parshall.	31
Ilustración 8. Río trenzado y sinuoso. (Vide, 1997).....	33
Ilustración 9. Distribución de velocidades en una sección ideal.....	38
Ilustración 10. Distribución de velocidades en una tubería.....	39
Ilustración 11. Distribución de velocidades en una tubería con un flujo con Número de Reynolds igual a 2×10^6	39
Ilustración 12. Distribución de velocidades en una tubería con flujo laminar.....	39
Ilustración 13. Distribución de velocidades en una tubería con flujo ideal, sin viscosidad.....	40
Ilustración 14. Distribución de velocidades en diferentes secciones transversales.....	41
Ilustración 15. División de una sección en dovelas método sección promedio.....	42
Ilustración 16. División de una sección en dovelas método sección media.....	42
Ilustración 17. Uso de sonda rígida para medición de profundidad.....	50
Ilustración 18. Uso de sonda flexible para medición de profundidad.	50
Ilustración 19. Uso de sonda flexible para medición de profundidad.	50
Ilustración 20. Molinete tipo Price.....	52
Ilustración 21. Molinete tipo hélice.	52
Ilustración 22. Ejecución de aforo por vadeo.	54
Ilustración 23. Ejecución de aforo desde canastilla flotante en la estación Oxolotán.	55
Ilustración 24. Contador OTT Z400.....	55
Ilustración 25. OTT ADC.....	56
Ilustración 26. Uso de equipo OTT MF Pro.	56
Ilustración 27. Efecto Doppler.....	57
Ilustración 28. Cambio de frecuencia por efecto Doppler.	58
Ilustración 29. Superposición de ondas alteradas por efecto Doppler.....	59
Ilustración 30. SPR300W.....	60
Ilustración 31. Q-EYE RADAR MT RV30 y RV11.....	60
Ilustración 32. RAVEN-EYE.....	60
Ilustración 33. OTT Kalesto.....	60
Ilustración 34. SOMMER RG30.....	61
Ilustración 35. Cuencas fronterizas del Sur de México.....	66
Ilustración 36. SOMMER RG30.....	68
Ilustración 37. RG30 ángulo de dispersión de haz.	68



Ilustración 38. Conectividad de RG30 a PC.	70
Ilustración 39. Diagrama de conexión de RG30 a PC con interface RS-485.....	70
Ilustración 40. Diagrama de conexión de RG30 a PC con interface RS-232.....	71
Ilustración 41. Conexión del RG30 a Datalogger por interface RS-485.....	71
Ilustración 42. Conexión del RG30 a Datalogger por interface SDI-12.	72



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Resumen mensual de gastos medidos en río Mezcalapa, estación Hidrométrica Peñitas.	17
Tabla 2. Número de dovelas recomendado en función del ancho de la sección.....	51
Tabla 3. Características generales de SOMMER RG30	61
Tabla 4. Características de medición de velocidad de SOMMER RG30	61
Tabla 5. Aforos realizados en río Suchiapa	63
Tabla 6. Parámetros de configuración de RG30 para uso con interface RS-485	69
Tabla 7. Resumen de aforos realizados con Sensor de velocidad superficial SOMMER RG-30, Molinete price, perfilador acústico Doppler	74
Tabla 8 Distribución de gastos en cada aforo realizado.....	76
Tabla 9. Relación de velocidades medias con los aforos realizados con molinete price y el sensor de velocidad superficial SOMMER RG-30	77
Tabla 10. Aforo realizado el 05 de mayo 2016 utilizando sensor de velocidad superficial SOMMER RG-30.....	84
Tabla 11. Aforo realizado el 07 de mayo 2016 utilizando sensor de velocidad superficial SOMMER RG-30.....	85
Tabla 12. Aforo realizado el 08 de mayo 2016 utilizando sensor de velocidad superficial SOMMER RG-30.....	86
Tabla 13. Aforo realizado el 09 de mayo 2016 utilizando sensor de velocidad superficial SOMMER RG-30.....	87
Tabla 14. Aforo realizado el 14 de mayo 2016 utilizando sensor de velocidad superficial SOMMER RG-30.....	88
Tabla 15. Aforo realizado el 20 de mayo 2016 utilizando sensor de velocidad superficial SOMMER RG-30.....	89
Tabla 16. Aforo realizado el 22 de mayo 2016 utilizando sensor de velocidad superficial SOMMER RG-30.....	90
Tabla 17. Aforo realizado el 27 de mayo 2016 utilizando sensor de velocidad superficial SOMMER RG-30.....	91
Tabla 18. Aforo realizado el 04 de junio 2016 utilizando sensor de velocidad superficial SOMMER RG-30.....	92
Tabla 19. Aforo realizado el 08 de junio 2016 utilizando sensor de velocidad superficial SOMMER RG-30.....	93
Tabla 20. Aforo realizado el 10 de junio 2016 utilizando sensor de velocidad superficial SOMMER RG-30.....	94
Tabla 21. Aforo realizado el 11 de junio 2016 utilizando sensor de velocidad superficial SOMMER RG-30.....	95
Tabla 22. Aforo realizado el 13 de junio 2016 utilizando sensor de velocidad superficial SOMMER RG-30.....	96
Tabla 23. Aforo realizado el 15 de junio 2016 utilizando sensor de velocidad superficial SOMMER RG-30.....	97
Tabla 24. Aforo realizado el 22 de junio 2016 utilizando sensor de velocidad superficial SOMMER RG-30.....	98



Tabla 25. Aforo realizado el 25 de junio 2016 utilizando sensor de velocidad superficial SOMMER RG-30.....	99
Tabla 26. Aforo realizado el 27 de junio 2016 utilizando sensor de velocidad superficial SOMMER RG-30.....	100
Tabla 27. Aforo realizado el 01 de julio 2016 utilizando sensor de velocidad superficial SOMMER RG-30.....	101
Tabla 28. Aforo realizado el 04 de julio 2016 utilizando sensor de velocidad superficial SOMMER RG-30.....	102
Tabla 29. Aforo realizado el 02 de mayo 2016 utilizando molinete price	103
Tabla 30. Aforo realizado el 05 de mayo utilizando molinete price	104
Tabla 31. Aforo realizado el 07 de mayo utilizando molinete price	105
Tabla 32. Aforo realizado el 08 de mayo utilizando molinete price	106
Tabla 33. Aforo realizado el 09 de mayo 2016 utilizando molinete price	107
Tabla 34. Aforo realizado el 14 de mayo 2016 utilizando molinete price	108
Tabla 35. Aforo realizado el 20 de mayo 2016 utilizando molinete price	109
Tabla 36. Aforo realizado el 22 de mayo 2016 utilizando molinete price	110
Tabla 37. Aforo realizado el 27 de mayo 2016 utilizando molinete price	111
Tabla 38. Aforo realizado el 04 de junio 2016 utilizando molinete price	112
Tabla 39. Aforo realizado el 8 de junio 2016 utilizando molinete price	113
Tabla 40. Aforo realizado el 10 de junio 2016 utilizando molinete price	114
Tabla 41. Aforo realizado el 11 de junio 2016 utilizando molinete price	115
Tabla 42. Aforo realizado el 13 de junio 2016 utilizando molinete price	116
Tabla 43. Aforo realizado el 15 de junio 2016 utilizando molinete price	117
Tabla 44. Aforo realizado el 22 de junio 2016 utilizando molinete price	118
Tabla 45. Aforo realizado el 25 de junio 2016 utilizando molinete price	119
Tabla 46. Aforo realizado el 27 de junio 2016 utilizando molinete price	120
Tabla 47. Aforo realizado el 01 de julio 2016 utilizando molinete price	121
Tabla 48. Aforo realizado el 04 de junio 2016 utilizando molinete price	122
Tabla 49. Relación de aforos realizados con perfilador acústico doppler.	123
Tabla 50. Relación de velocidades del aforo 1	124
Tabla 51. Relación de velocidades del aforo 2	125
Tabla 52. Relación de velocidades del aforo 3	126
Tabla 53. Relación de velocidades del aforo 4	127
Tabla 54. Relación de velocidades del aforo 5	128
Tabla 55. Relación de velocidades del aforo 6	129
Tabla 56. Relación de velocidades del aforo 7	130
Tabla 57. Relación de velocidades del aforo 8	131
Tabla 58. Relación de velocidades del aforo 9	132
Tabla 59. Relación de velocidades del aforo 10	133
Tabla 60. Relación de velocidades del aforo 11	134
Tabla 61. Relación de velocidades del aforo 12	135
Tabla 62. Relación de velocidades del aforo 13	136



Tabla 63. Relación de velocidades del aforo 14	137
Tabla 64. Relación de velocidades del aforo 15	138
Tabla 65. Relación de velocidades del aforo 16	139
Tabla 66. Relación de velocidades del aforo 17	140
Tabla 67. Relación de velocidades del aforo 18	141
Tabla 68. Relación de velocidades del aforo 19	142
Tabla 69. Relación de velocidades del aforo 20	143
Tabla 70. Clasificación de Sistemas de Aeronaves Pilotadas a Distancia.....	163



ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Relación de aforos realizados con Sensor de velocidad superficial SOMMER RG-30, Molinete price, perfilador acústico Doppler	75
Gráfica 2. Relación de velocidades medias con los aforos realizados con molinete price y el sensor de velocidad superficial SOMMER RG-30	78
Gráfica 3. Dispersión de velocidades calculadas con el Sensor de velocidad superficial Sommer RG30 y el molinete price	80
Gráfica 4. Relación de velocidades del aforo 1	124
Gráfica 5. Relación de velocidades del aforo 2	125
Gráfica 6. Relación de velocidades del aforo 3	126
Gráfica 7. Relación de velocidades del aforo 4	127
Gráfica 8. Relación de velocidades del aforo 5	128
Gráfica 9. Relación de velocidades del aforo 6	129
Gráfica 10. Relación de velocidades del aforo 7	130
Gráfica 11. Relación de velocidades del aforo 8	131
Gráfica 12. Relación de velocidades del aforo 9	132
Gráfica 13. Relación de velocidades del aforo 10	133
Gráfica 14. Relación de velocidades del aforo 11	134
Gráfica 15. Relación de velocidades del aforo 12	135
Gráfica 16. Relación de velocidades del aforo 13	136
Gráfica 17. Relación de velocidades del aforo 14	137
Gráfica 18. Relación de velocidades del aforo 15	138
Gráfica 19. Relación de velocidades del aforo 16	139
Gráfica 20. Relación de velocidades del aforo 17	140
Gráfica 21. Relación de velocidades del aforo 18	141
Gráfica 22. Relación de velocidades del aforo 19	142
Gráfica 23. Relación de velocidades del aforo 20	143



RESUMEN.

El presente trabajo es un estudio teórico práctico que se realizó con la finalidad de validar la implementación de un equipo no intrusivo de medición de velocidades superficiales en una corriente de agua, utilizando para ello una tecnología de radar. El interés surge de la necesidad de medición del caudal en condiciones no adecuadas para el uso de los equipos convencionalmente utilizados para este fin, donde no se cuenta con estructuras de apoyo o donde las condiciones de los ríos obligan a realizar mediciones en sitios de difícil acceso. Con este propósito se realizó un estudio del funcionamiento de un equipo no intrusivo para proponer las características que debe tener el equipo a utilizar. Se realizaron pruebas utilizando un sensor de velocidad superficial del agua aarca SOMMER modelo RG30 para medir la velocidad superficial y calcular la velocidad media en una sección y comparar los datos generados con los obtenidos con el uso de un molinete price y un perfilador Doppler. Los resultados demostraron que el uso de esta tecnología puede ser utilizado en la operación como una herramienta de apoyo para la medición del caudal. Se estudiaron los procedimientos y normas que validan el uso de los métodos aquí descritos.

ABSTRACT.

The present work is a practical theoretical study that was carried out in order to validate the implementation of a non-intrusive equipment for measuring surface velocities in a water current, using radar technology. The interest arises from the need to measure the flow in unsuitable conditions for the operation of equipment conventionally used for this purpose, where there are no support structures or where river conditions require measurements in hard-to-reach places . For this purpose, a study of the operation of non-intrusive equipment was carried out to propose the characteristics that the equipment to be used should follow. Tests were performed using a SOMMER RG30 sensor to perform calculations of the average velocity in a section and the data generated were compared



with those obtained with the use of a price reel and a Doppler profiler. The results obtained showed that the use of this technology can be used in the operation as a support tool for flow measurement.

The procedures and norms that validate the use of the methods described here were studied.



1.0 INTRODUCCIÓN.

1.1 Medición de caudal.

El agua, como elemento esencial de la vida, ha sido tema de interés y estudio desde tiempos remotos. Las plantas, los animales y el hombre tienen una necesidad total de ella. Las primeras ciudades surgen en torno a lagos o ríos, la agricultura y la ganadería dependen de la presencia de agua. La gestión adecuada del recurso hídrico ha sido vital para la supervivencia de los pueblos. El conocer y poder cuantificar el caudal de un río es una actividad primordial ya que el caudal de un río no se mantiene constante, sino que es variable. A la evolución habitual del caudal de un río a lo largo de un año se le denomina régimen fluvial.

Existen diferentes métodos para la medición del caudal en flujos a superficie libre, cada uno de ellos es adecuado dependiendo el tipo de corriente que se esté analizando. En el capítulo 5 se hará mención de los diferentes métodos y tecnologías utilizadas en la medición de corrientes a superficie libre.

1.2 Medición de caudales en Chiapas.

En los estados de Chiapas y Tabasco se ubican y gestionan las Regiones Hidrológicas 23 (Costa de Chiapas) y 30 (Grijalva-Usumacinta). Los ríos Usumacinta y Grijalva son los más caudalosos del país, los ríos de la Costa de Chiapas tienen tiempos de respuesta rápida, es decir, se dan condiciones de cauce distintas; el área de las cuencas, la pendiente media, longitud, el uso de suelo y vegetación, la edafología, etc., hacen que la respuesta ante las precipitaciones sea diferente. Un parámetro muy importante a medir es el gasto en estos cauces, ya sea horario, diario, mensual, anual o incluso de un evento particular. Esta información es vital en la realización de estudios hidrológicos para el diseño de infraestructura hidráulica.



Cuando se cuenta con un conjunto de datos de aforos, siguiendo las recomendaciones del manual para medición de caudales de la Organización Meteorológica Mundial (OMM) documento No.1044 y la ISO748, es posible generar curvas Gasto-Elevación que permitan conocer el flujo volumétrico a partir del valor de nivel observado en una sección determinada.

En condiciones de avenidas, la dificultad de medición se incrementa ya que los equipos utilizados para medir el caudal son de tipo intrusivo, es decir, están en contacto directo con la superficie del agua o sumergidos en el caudal. Para poder tener una aproximación al caudal que transita se realiza una inferencia mediante la extrapolación de datos obtenidos a partir de las Curvas Gasto-Elevación. Sin embargo, estos datos generan mucha incertidumbre ya que la curva no se realizó con estos volúmenes de gastos extraordinarios, es decir es un método “válido” hasta cierto punto.

Para la ejecución de aforos se tienen secciones de control establecidas en donde se han instalado estructuras fijas para la medición, como el caso de canastillas de vuelo. En caso de que el aforo se realice por método de vadeo se cuenta con los señalamientos para la ejecución adecuada. Sin embargo, hay ríos muy anchos, como el Grijalva y el Usumacinta, donde las mediciones se realizan desde puentes, ya que en los sitios de medición no es costoso instalar y mantener estructuras fijas como son las canastillas para vuelo. En mediciones realizadas desde este tipo de estructuras se desprecian los fenómenos que se llegan a presentar en las pilas y estribos, las mediciones no se realizan en una sección hidráulica ideal. Otros ríos, de respuesta rápida como los ríos de la Sierra en Tabasco, en condiciones de avenidas presentan un arrastre importante de sólidos, piedras, árboles, lo que hace prácticamente imposible la medición del caudal ya que los equipos de medición intrusivos serían arrastrados por la corriente.

Existen sensores no intrusivos los cuales utilizan el efecto Doppler que permiten obtener datos de velocidad superficial a partir de la cual se puede calcular la velocidad media de una sección. Teniendo los datos de velocidad media de la sección y conociendo el área



hidráulica es posible tener una aproximación del caudal en una avenida. La medición de velocidad superficial, en diferentes puntos a lo largo de la sección permitirá validar los datos generados por la curva Gasto-Elevación permitiendo una calibración de dicha curva para estas condiciones.

El objetivo principal de este trabajo de investigación es realizar un estudio para determinar el cálculo de caudal en secciones de corriente a superficie libre mediante el uso de un sensor no intrusivo para medir la velocidad superficial de flujo.

El uso del sensor de velocidad superficial, utilizando el método de división por dovelas, puede ser una herramienta útil para la medición en campo en condiciones hidrológicas adversas o en sitios de difícil acceso.

Para comparar las pruebas de aforo se propusieron mediciones en condiciones favorables utilizando el sensor no intrusivo y comparando estos datos con los medidos usando equipos intrusivos calibrados.

2.0 JUSTIFICACIÓN

El presente estudio surge de la necesidad de realizar aforos en sitios donde se presentan dificultades para su ejecución. En los puntos principales donde se lleva un monitoreo constante de los ríos se tienen estacione fijas con estructuras de apoyo y donde se cuenta con registros de muchos años. Existen otros puntos donde, en los últimos años, se requiere comenzar con una medición de caudal que, en caso de avenidas, puede afectar zonas habitadas aguas abajo, por lo que es necesario conocer con cierto tiempo la probabilidad de que ocurra una avenida para tomar acciones de alertamiento y prevención.

Las mediciones periódicas del caudal y las observaciones simultáneas de la superficie libre del agua en un afluente proporcionan la información para el trazado de la curva Gasto-Elevación. En la mayoría de los casos la curva de gastos de una sección es parabólica, sin embargo, puede mostrar algunas irregularidades si el control cambia entre gastos bajos y altos, o si la sección transversal es irregular. La utilidad básica de la curva de gastos, consiste en poder inferir rápidamente el gasto de un instante, con solo conocer la elevación de la superficie del agua en la corriente.

Durante el periodo de noviembre de 2013 hasta septiembre de 2014 se realizaron aforos en la sección de la estación hidrométrica Peñitas, la cual se ubica en el río Mezcalapa, latitud $17^{\circ}27'34.25''N$ y longitud $93^{\circ}28'17.25'' O$, comenzando el día 30 de diciembre de 2013 y terminando el 19 de septiembre de 2014 con el fin de monitorear el comportamiento del río Mezcalapa. La Ilustración 1 muestra una imagen de la estación instalada en un tubo cerca de la margen izquierda del río.

En la tabla 1.1 se presentan los gastos mínimos, máximos y promedios que se obtuvieron en los meses en que se realizaron los trabajos de aforo convencional, así como el rango de variación (diferencia entre gasto mínimo y máximo) que se presentó en el sitio de estudio. Estos aforos se realizaron utilizando un perfilador ADCP, ya que el uso de molinetes era prácticamente imposible, no hay estructura de control tal como una canastilla para vuelo, por lo que el aforo se realizó desde lancha.

Tabla 1. Resumen mensual de gastos medidos en río Mezcalapa, estación Hidrométrica Peñitas.

CORRIENTE	SITIO DE ESTUDIO	MES	AFOROS	MÍNIMO m ³ /s	MÁXIMO m ³ /s	PROMEDIO m ³ /s
Río Mezcalapa	Peñitas	Noviembre-2013	1	748.94	748.94	748.94
		Diciembre-2013	33	761.84	1,697.86	1,197.21
		Enero-2014	28	1,010.68	1,500.98	1,325.90
		Febrero-2014	3	1,513.40	1,617.21	1,563.86
		Marzo-2014	11	1,103.97	1,687.84	1,311.96
		Junio-2014	2	1,098.50	1,250.37	1,151.93
		Julio-2014	4	1,198.50	1,412.50	1,321.78
		Agosto-2014	13	560.92	1,066.44	903.07
		Septiembre-2014	24	384.19	1,080.15	718.54



Ilustración 1. Estación Hidrométrica Automática Peñitas.

Resultados de los aforos

Para la estación hidrométrica se elaboró un archivo electrónico con los datos obtenidos de los aforos ejecutados, los de mayor calidad fueron aquellos obtenidos durante el mes de agosto, mes en el cual se realizaron estudios de manera coordinada entre la Comisión Federal Electricidad (CFE) y la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) y presentaron descargas variables por los vertedores de la presa hidroeléctrica Peñitas ubicada aproximadamente 5 km aguas arriba de la estación. De los datos recopilados se obtuvo un rango de elevaciones del nivel que van desde los 39.5 a los 42.0 msnm y para cada escala observada se obtuvo un área, velocidad media y gasto de la sección, los cuales en base al incremento de la escala se presenta su respectivo incremento de cada una de sus características hidráulicas. Como claro ejemplo se puede apreciar en la ilustración 2 el incremento del gasto en función de la escala.

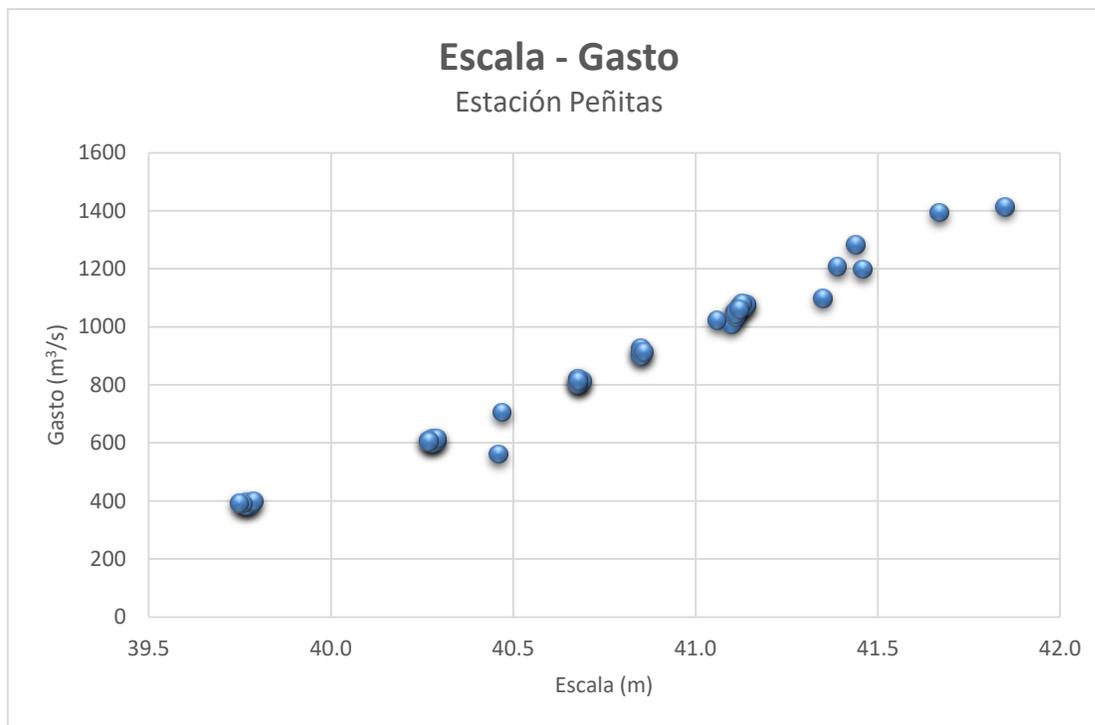


Ilustración 2. Distribución de datos Niveles-Gastos.



Con los datos de los aforos recopilados se buscó la relación nivel-gasto de la estación hidrométrica a partir de la construcción de las respectivas curvas de ajuste óptimo, y de su intervalo de confianza.

Para determinar las ecuaciones se aplicaron métodos de análisis de regresión y se calcularon los parámetros de ajuste estadístico aplicables para la curva que definan la relación Gasto-Elevación. Los valores observados del gasto difieren generalmente de los que predice la ecuación, por lo que la ecuación o ecuaciones más eficaces son aquella que describen el gasto con la menor diferencia entre los valores observados y los predichos por las ecuaciones.

Para poder obtener esta ecuación se reunió la información de la relación Gasto-Elevación de la campaña de aforos con el fin de formar una población de datos.

Una vez ordenados los datos de aforo se elaboró una gráfica de dispersión con los datos obtenidos utilizando el programa Excel [®] de Microsoft, en donde la variable dependiente es el gasto (Q) y la variable independiente es la elevación (E).

Una vez obtenida la ecuación de dispersión para cada uno de los ordenamientos de datos, se depuraron los gastos picos que no estaban dentro de la tendencia del grupo de datos y se creó una aproximación de la curva para verificar si existía un ajuste que pudiera caracterizar a la dispersión de datos de forma sencilla. Se utilizó una curva de segundo grado para aproximar la dispersión de datos en la curva de Gasto-Elevación obtenida, como se muestra en la ilustración 3.

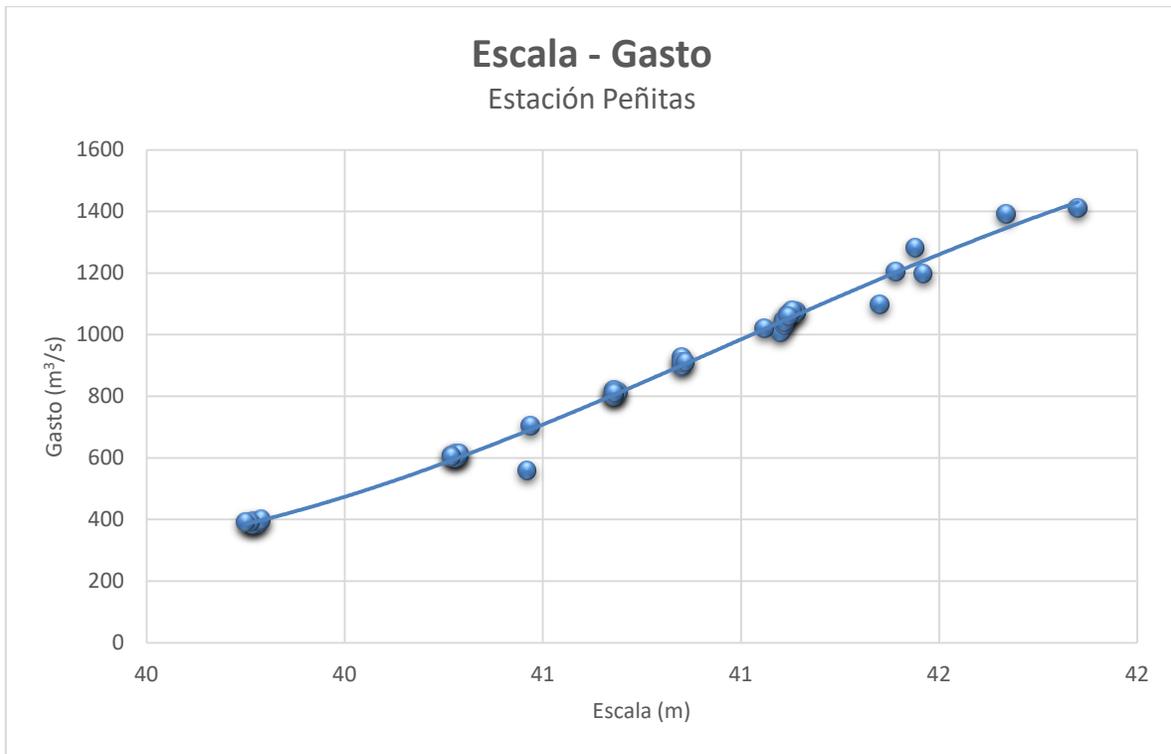


Ilustración 3. Curva ajustada a la distribución de datos Nivel-Gasto.

Cabe mencionar que para la gráfica de dispersión se construyó y probó una serie de curvas además de analizar sus parámetros estadísticos, con lo que finalmente se obtuvo la ecuación con mejor ajuste.

La Ecuación obtenida fue la siguiente:

Variable independiente	Ecuación para determinar el gasto (Q) en la Estación Hidrométrica Peñitas.
Elevación (E)	$y = -1,849.3726x^2 + 228,088.65x + \frac{127,556,930}{x} - 9,352,993.8$

Ajuste $R^2 = 0.9324$

La cual es válida dentro del rango de valores medidos de elevaciones de 39.75m a 41.35m.

Una vez que se tiene el gasto en función de la elevación se sustituyeron los valores de “x” en la ecuación para obtener los valores de “y” con esto se obtuvieron los gastos



ordenados de forma ascendente. Con el fin de comprobar que los datos de gasto obtenidos mediante las ecuaciones polinómicas se encuentran dentro del rango de valores válidos se sobrepusieron los valores de la campaña de aforo sobre la curva de distribución representativa para la elevación.

Se infirieron datos extrapolando en la curva para determinar el gasto en rangos superiores a los validados con medición en campo.

Desde el momento en que se realizó la ejecución de los aforos se dedujo la dificultad de contar con una cantidad de mediciones fiables debido a los problemas técnicos para la realización de los aforos en el sitio de medición: Fuerza de arrastre de la corriente que dificultaba las maniobras del vehículo desde el cual se transportaba el equipo de medición lo cual provocaba un uso incorrecto del equipo. Debido a la forma de la sección, el sitio donde se instaló la estación de medición se encuentra muy cerca de la margen izquierda, siendo éste uno de los puntos de mayor profundidad que garanticen tener siempre un tirante aun en las condiciones en las que el río tenga un transporte muy bajo de caudal, sin embargo, la cercanía con la margen genera ciertos fenómenos de turbulencia y vorticidad que afectan directamente a la medición de velocidad superficial en este punto.

Durante la ejecución de los trabajos se encontraron dificultades para la medición, fue necesario el uso de un equipo perfilador Doppler acústico. Debido a que no se tiene una estructura de apoyo como un puente o canastilla suspendida, las mediciones se realizaron utilizando una lancha para el transporte del equipo de medición. En las condiciones que se tenían gastos superiores $1200 \text{ m}^3/\text{s}$ se presentaban velocidades superficiales que dificultaban el mantener un trazo en línea recta, en las condiciones con gastos menores a $500 \text{ m}^3/\text{s}$ la sección llegaba a presentar tirantes muy bajos que dificultaban e incluso imposibilitaban el traslado en la lancha y el uso del equipo, el cual requiere un tirante mínimo de 0.8 m para su correcto funcionamiento, obligando a buscar un cambio de sección para el cálculo del gasto.



Éste es el motivo por el cual surge el presente trabajo, de la necesidad de proponer alternativas para la ejecución de aforos en condiciones donde no es factible el uso de equipos intrusivos por las complejidades que presente la sección de medición.

Las mediciones de caudal, de acuerdo a las recomendaciones de la Organización Mundial de Meteorología (OMM por sus siglas en inglés) y la ISO748 se realizan mediante la división en dovelas de una sección, se ejecutan varias mediciones en diferentes puntos de los tirantes definidos para medición y de esa forma se obtiene un conjunto de subsecciones en las cuales, de manera individual, se hace un cálculo de velocidad media y su área hidráulica. La sumatoria de todas ellas dará el caudal, el área hidráulica y la velocidad media de esta sección. En ríos grandes, para poder realizar de manera correcta estas mediciones se debe contar con una infraestructura de apoyo, ya sea en puentes o con el uso de canastillas, desde donde se realiza la medición. Los equipos utilizados en la medición son intrusivos, para estabilizarlos en el cauce se auxilian de escandallos y veletas, sin embargo en condiciones de avenidas, con velocidades arriba de 2 m/s, los ríos traen un arrastre de sedimentos y materiales en suspensión como ramas, árboles y boleas que dificultan e imposibilitan el uso de los equipos intrusivos, además las mediciones en estas condiciones pueden poner en riesgo los instrumentos y la vida del personal que los maneja. Las mediciones realizadas desde puentes se ven afectadas por los efectos de turbulencia generados por las estructuras sumergidas, lo que incrementa la incertidumbre del dato obtenido.



3.0 OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Analizar el uso de un equipo no intrusivo para determinar la velocidad media del agua, como herramienta de apoyo en la medición del caudal en una sección hidráulica comparando con mediciones realizadas mediante el uso de equipo intrusivo.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- Validar el uso de un equipo no intrusivo con la normatividad que rige para la correcta ejecución de mediciones de caudal.
- Describir las diferentes tecnologías y sensores utilizados para la medición de caudal en el método área sección.



4.0 HIPOTESIS

El uso de un equipo no intrusivo para medición de velocidad superficial del agua por tecnología de radar permitirá, por medio del seccionamiento en dovelas de una sección, determinar la velocidad media del fluido. El uso de este equipo de medición es una alternativa para la medición del caudal en condiciones de avenidas donde el uso de sensores por inmersión o contacto directo pueden verse afectados y pone en peligro al personal que ejecuta los trabajos.

5.0 MARCO CONCEPTUAL

La medición del caudal es importante principalmente en situaciones en las que la gestión del agua es una preocupación prioritaria. Chow menciona que ecuaciones empíricas como Chezy, Darcy-Weisbach y Manning, que se denominan métodos área pendiente, no eran muy eficaces (Chow, 1959). Rantz mencionó que el cálculo del caudal puede ser realizado por estas ecuaciones empíricas, sin embargo destaca que el método más recomendado depende de las características de la corriente y su aplicación.

En estudios más recientes de ingeniería hidráulica se ha implementado el concepto de entropía por Chao Lin Chiu. “El parámetro de entropía “M” y la máxima velocidad “Vmax” se enfatizan como nuevos parámetros significativos. Muchas de las propiedades de flujo se pueden expresar en términos de “M”. El conocimiento de la velocidad máxima “Vmax” permite conocer los intervalos de la velocidad del flujo en una sección transversal del canal (Chiu Lin, 1992).

De acuerdo a estudios realizados Thomas Yorke y Kevin Oberg (York & Oberg, 2002) de la velocidad y el caudal de río utilizando perfiladores acústicos de corrientes de tipo Doppler mencionan:

Los instrumentos tienen diferentes configuraciones y frecuencias; La elección adecuada del instrumento depende de varios factores incluyendo la profundidad, el ancho y la carga de sedimentos de los ríos que se está midiendo. Los perfiladores acústicos Doppler se montan en lanchas o pequeñas balsas amarradas dirigidas por control remoto que permiten a los usuarios realizar mediciones del caudal de manera rápida, precisa en grandes ríos y ríos con condiciones de flujo inestable debido a las inundaciones o liberaciones irregulares de depósitos.

Ardiclioglu presentó un nuevo acercamiento al concepto de entropía en hidráulica para determinar la distribución de la velocidad y el caudal en los arroyos. En su trabajo se examinaron las distribuciones de caudal y velocidad de los flujos de canales abiertos



naturales utilizando la teoría de la entropía. Se demostró que la velocidad máxima “ V_{max} ” y su posición Z_{max} ”, podrían obtenerse simplemente como una función de la Profundidad “ H ”.

C. Comina, M. Lasagna, D. A. De Luca, y L. Sambuelli, (Comina, M. de Luca, & Sambuelli, 2013) hacen hincapié en que:

Las medidas de descarga por medio de la agrupación, el método de dilución de sal es una tradicional y bien documentada técnica. Sin embargo, esta metodología puede ser fuertemente influenciada por las características naturales del canal como por ejemplo el tipo de flujo (Flujo Laminar vs Flujo Turbulento) y las precauciones precisas deben considerarse en la elección tanto de la sección de medición y la longitud del alcance de medición del canal.

5.1 MEDICIÓN E INSTRUMENTACIÓN EN HIDRÁULICA FLUVIAL

La medición del caudal o gasto se fundamenta en la ley de la conservación de la masa, que enuncia “la materia o masa no puede ser creada o destruida”. Una definición más extensa es la que se encuentra en la norma de la Organización Internacional de Estandarización ISO772, “el movimiento de un volumen fluido se identifica por la traslación de una sustancia que no es un sólido o un gas y es prácticamente incompresible, además no ofrece una resistencia significativa al cambio de forma que fluye libremente”.

Existen diferentes métodos utilizados en la medición de caudal, siendo los más utilizados:

5.1.1. Método volumétrico.

Su principio de medición es cuantificar el volumen o masa por unidad de tiempo realizando una medición directa de todo el volumen en estudio. El método es muy preciso en aplicaciones de campo o laboratorio, tiene una incertidumbre menor al 2%, su principal limitante en la aplicación es la habilitación del tanque volumétrico.

Es un método ampliamente utilizado en laboratorios para medición de masa o volumen, también es un método utilizado en la medición de algunos lagos de pequeñas dimensiones o en embalses donde se tiene un conocimiento preciso de la batimetría.

El procedimiento para la medición por este método se describe en el procedimiento de la norma ISO-8316:1987 (ISO8316, 1987) y el procedimiento de la norma la ISO/TR 11330:1997 (ISO/TR11330, 1997).

En este método el caudal o gasto se define como la contabilización de una cantidad de masa en una unidad de tiempo.

$$Q = \frac{V}{t}$$

Donde V es el Volumen [L³]; t es tiempo [T] y Q es el caudal o Gasto [L³/T] como se muestra en la ilustración 4.

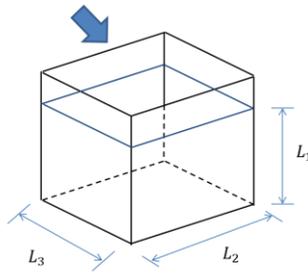


Ilustración 4. Método volumétrico.

Para la aplicación de este método es necesario contar con un recipiente de forma conocida y contabilizar el tiempo de llenado con un cronómetro, ver Ilustración 5.

Con este método se realiza una cuantificación directa del volumen o masa del flujo, si se conocen las dimensiones y el tiempo de llenado se tiene un método primario.

Este método es utilizado para la calibración de los medidores de flujo en tuberías, por ejemplo, en México el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) cuenta con dos bancos para la calibración de micro y macro medidores en tuberías de agua fría.

Este método se recomienda para ser utilizado únicamente en la medición de caudales pequeños menores o iguales a 30 l/s.



Ilustración 5. Aplicación del método volumétrico en un muestreo para análisis de calidad del agua.



5.1.2. Método Área-Velocidad.

Su principio de medición es integrar la variación del vector normal de velocidad en un área transversal de una vena líquida. Presenta una incertidumbre menor al 2% cuando se aplica en tuberías y menor al 5% al ser aplicada en canales. Es el método más utilizado en la medición de caudal en canales y ríos. Cuenta con diferentes tecnologías para la medición de velocidad. Las normas que validan el correcto funcionamiento, en función de la tecnología utilizada en la medición son las siguientes:

- Medición con molinetes en canales. ISO-748:2007 (ISO748:2007, 2007)
- Medición con molinetes en tuberías. IEC-60041 (IEC60041:1991, 1991)
- Medición con flotadores. ISO-748:2007 (ISO748:2007, 2007)
- Con medidor ultrasónico de tiempo de travesía en tuberías. IEC-60041 Anexo 1 (IEC60041:1991, 1991)
- Con medidor ultrasónico de tiempo de travesía en canales. ISO-6416:2004 (ISO6416:2004, 2004)
- Con medidor ultrasónico de efecto Doppler en canales. ISO/TR 24578:2012 (ISO/TR24578:2012, 2012)
- Medición de flujo con PIV (Particle Image Velocimetry) en canales. En desarrollo.

En el apartado 5.3 se hará mención detallada del procedimiento de la Norma ISO748:2007.

Este es el método que será analizado en el presente trabajo por lo que será abordado con mayor detalle.

5.1.3. Cambio de régimen.

Como principio de medición este método analiza la condición mínima de energía en un flujo a superficie libre. Presenta una incertidumbre menor al 2%.

Este método tiene las condiciones que, para la formación de cambio de régimen, es necesario una larga extensión del canal, las instalaciones de medición se conocen como estructuras aforadoras; el aforador de garganta larga permite adaptar el coeficiente de descarga en función del diseño. El correcto uso de este principio se describe en Normas ISO, en función del tipo de aforador que se vaya a utilizar:

- Cresta delgada (V o rectangular). ISO-1438:2008 (1438:2008, 2008)
- Cresta delgada con contracciones (V o rectangular). ISO-1438:2008 (1438:2008, 2008)
- Cresta gruesa. ISO-3846:2008 (ISO3846:2008, 2008)
- Aforador Parshall & SANIIRI. ISO-9826:1992 (ISO9826:1992, 1992)
- Aforador con el método de caída libre. ISO-3847:1977 (ISO3847:1977, 1977)
- Aforador tipo U de sección rectangular o trapezoidal. ISO-4359:2013 (ISO4359:2013, 2013)
- Aforador de perfil triangular. ISO4360:2008 (ISO4360:2008, 2008)
- Aforador de garganta larga. ISO-4362:2002 (ISO4362:1999, 1999)

Este método utiliza la ecuación de la energía con la cual se demuestra la unicidad en la relación tirante-caudal. Es un método confiable y con bajo mantenimiento, aplicable en aquellas condiciones en las que es posible realizar afectaciones a la sección de estudio, ver ilustración 6.



Ilustración 6. Aforador de garganta larga.

El método utiliza el principio de la energía mínima, el cual se presenta cuando existe una caída de agua. En esta condición el tirante H se presenta para un solo caudal Q .

Por lo tanto $Q \propto H$

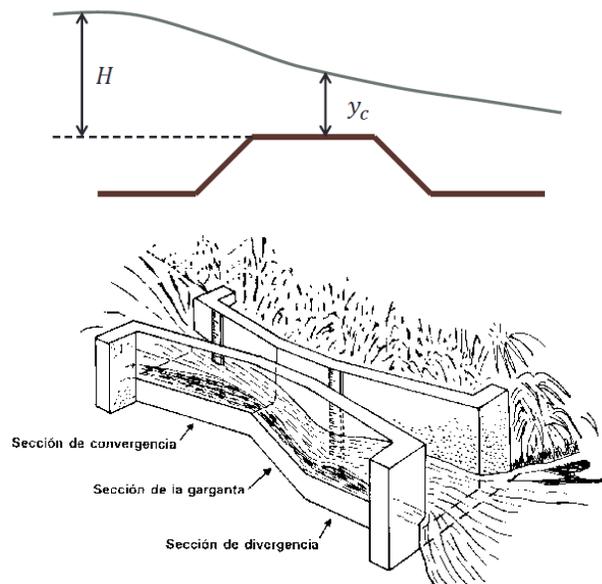


Ilustración 7. Ejemplo aforador Parshall.

Dependiendo de la sección transversal se tienen curvas diferentes, por ejemplo para un aforador Parshall, Ilustración 7, se tiene la ecuación $Q = C_d b h^{3/2}$. Donde C_d es el coeficiente de descarga; b es el ancho de la garganta y h la carga aguas arriba de la descarga.

5.1.4. Sección- pendiente.

Considera la condición de flujo normalizado por efecto de la rugosidad del canal. Tiene una incertidumbre menor al 10%. Es un método que permite estimar avenidas en eventos extremos y es comúnmente utilizado en estaciones hidrométricas en ríos. Este método se describe ampliamente en la ISO-1070:1992 (ISO1070:1992, 1992). El método es recomendado para su uso bajo ciertas condiciones especiales, donde la medición directa por descarga o la medición por métodos más precisos no sea posible. Puede ser utilizado con una precisión razonable en canales abiertos donde se tenga homogeneidad de paredes, fondo y bordes (por ejemplo roca), en canales lineales y en canales con relativamente el mismo tipo de material. En otros casos se pueden presentar incertidumbres y no es recomendado su uso en canales muy largos, canales con pendientes muy bajas y alta carga de sedimentos o canales que presenten muchas curvaturas (ISO1070:1992, 1992).

Este método tiene su origen en la ecuación de velocidad propuesta por Manning:

$$V = \frac{1}{n} * Rh^{2/3} * S^{1/2}$$

Donde n es el coeficiente de Manning, Rh es el Radio Hidráulico de la sección de estudio y S la pendiente existente entre los dos puntos de medición.

Para aplicar correctamente este método se requiere un tramo de río lo más recto posible, uniforme en la conformación de la sección de escurrimiento, dos secciones específicas y la medición de la altura hidrométrica del río en el sitio. Con el promedio de las 2 secciones y los 2 radios hidráulicos, el cálculo de la pendiente se puede estimar el caudal

multiplicando la sección de escurrimiento promedio por la velocidad. La precisión se obtiene con el ajuste al coeficiente de Manning n .

5.2 MÉTODO SECCIÓN VELOCIDAD

Para poder ejecutar de manera correcta una medición de caudal utilizando el método de Sección-velocidad es necesario conocer los conceptos hidrológicos básicos que operan en una sección de estudio.

El escoger la sección hidráulica de estudio es muy importante. En canales naturales es muy difícil encontrar tramos rectos y secciones uniformes.

En su libro de Ingeniería fluvial Juan P. Martín Vide (Vide, 1997) menciona:

Si se le permitieran todos sus grados de libertad, un río es una corriente de agua que forma su cauce ajustando libremente su anchura, profundidad y el fondo. El problema de predecir o deducir esta geometría ha sido tema de estudio durante muchos años de investigadores en geomorfología. Se cuenta con observaciones relativamente sencillas de las características geométricas de los ríos que sugieren relaciones empíricas entre ellas.

La primera relación empírica de interés es aquella que trata de explicar las condiciones en las cuales un río forma un cauce trezado o un cauce único meandriforme. La relación $i \cdot Q^{0.44} = 0.0116$, en la que i es la pendiente y Q el caudal en m^3/s , establece una frontera entre una y otra morfología. Si $i \cdot Q^{0.44} > 0.0116$ el río es trezado, en caso contrario presentará una morfología meandriforme. Esta frontera no distingue nítidamente, sino que se traza dentro de una considerable dispersión. Muchos ríos son trezados y sinuosos al mismo tiempo, ilustración 8, por lo que la clasificación es todavía más difusa. El carácter trezado y el meandriforme pueden verse como dos ingredientes presentes en distintas proporciones en un río real. Es frecuente que un río sea trezado en su tramo alto y luego pase a ser meandriforme aguas abajo, donde la pendiente es menor aunque el cauce es mayor.

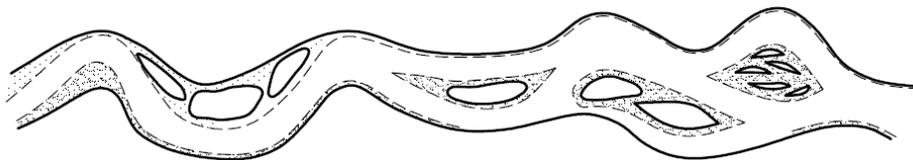


Ilustración 8. Río trezado y sinuoso. (Vide, 1997)

También se ha observado, examinando las dimensiones de las secciones transversales de los ríos, que la anchura B , es proporcional a la raíz cuadrada del caudal $B \leftrightarrow Q^{1/2}$, es decir,



que un río cuatro veces más caudaloso que otro tendrá una anchura aproximadamente del doble.

La velocidad es una unidad vectorial y esta no es paralela a los contornos del río, como se podría suponer en una primera instancia, sino que presenta derivaciones, Leliavsky refutó a la escuela *paralelista* y demostró este hecho en 1894 en estudios realizados por medio de una veleta desde una barca en el río Dniéper (Leliavsky). El módulo de la velocidad tampoco es uniforme a través de una sección, en general el agua corre con mayor velocidad por las partes más hondas.

La parte más honda de una sección se conoce como thalweg, o línea de vaguada, y señala la corriente más veloz de un río. En la geometría fluvial de un cauce principal sinuoso, un caudal menor Q_1 dará lugar a una corriente de mayor curvatura en la curva, así como convergente hacia la curva y divergente a la salida de la curva. Estas características pueden deducirse a partir de las secciones transversales ideales recorridas por distintos caudales menores que el caudal que llena el cauce, conocido como caudal dominante. La desviación de la velocidad respecto al contorno ocurre en todas partes de la vena, pero es más notable en los puntos de inflexión, donde el ángulo sea mayor a 30° . El flujo convergente hacia la curva implica una concentración de caudal, hay un aumento del caudal unitario por reducción de anchura, y por ello se provoca una erosión en el fondo, mientras que el flujo divergente desde la curva implica una expansión del caudal, disminución del caudal unitario por aumento de anchura, y por ello una acreción del fondo. Estrechamientos o convergencia de la corriente, y ensanchamientos, divergencia de la corriente, están de esta forma ligados a las curvas de los ríos.

Cuando el caudal aumenta hasta llenar el cauce, cuando se presentan avenidas, al tiempo que la superficie libre sube, la corriente erosiona el fondo en las hoyas provocando su descenso, y deposita o sedimenta en los vados, provocando su ascenso. Ambos movimientos son menores que la fluctuación de la superficie libre, pero son importantes de analizar. Una explicación a estos hechos la da la pendiente motriz I , es decir la energía gastada en el movimiento por unidad de longitud. La pendiente I de las aguas altas es mayor que la de los cauces en aguas bajas, es decir, hay una tendencia a erosionar en sus fondos, pero puede ser menor que la pendiente en los vados en aguas bajas, hay una tendencia a depositar sedimentos en ellos. Los fondos vuelven a su estado anterior, aproximadamente, al descender el nivel. En las avenidas la corriente se “estabiliza”, es decir, pierde sinuosidad en su trayectoria, gracias a que surgen primero y se erosionan después los montículos de sedimento, o barras laterales en las partes convexas de las curvas, las cuales se reponen al descender el nivel. Es posible hacer una analogía entre la intensidad de la corriente o caudal y la tensión de tracción de una cuerda o cable.



Sin embargo los efectos no se compensan perfectamente entre el descenso y el ascenso del caudal y finalmente, tras una avenida, la línea de vaguada puede haber sufrido una evolución, en progresión y en profundización, y de manera paralela las “playas” en las barras laterales pueden haber crecido hacia abajo y hacia adentro y las orillas haber retrocedido. Estos movimientos del thalweg o línea de vaguada explican la formación de los meandros de manera general. Una razón de la falta de compensación entre las dos fases de la avenida es casi siempre que el descenso del hidrograma dura más que el ascenso. Con el caudal todavía alto, pero descendiente, la corriente, ya más curvada, tiene tiempo de moldear una línea de vaguada más profunda y erosionar la orilla exterior. Los lugares más hondos, ligeramente aguas debajo de los puntos de máxima curvatura según Fargue, son los más sensibles.

Cuando la avenida produce el desbordamiento del río, el caudal desbordado se apresta a seguir la dirección del valle, independientemente de la dirección del cauce principal. Sin embargo la corriente principal puede seguir estando sobre dicho cauce más hondo. En todo caso dicho cauce puede condicionar o desviar más o menos la dirección del agua desbordada. Los cambios en el cauce principal pueden ser más intensos y bruscos cuando el río está desbordado pero también pueden ocurrir cuando las aguas vuelven a su cauce.

Recordemos que las corrientes son masas en movimiento con una inercia al cambio de dirección. El contorno opone una fuerza exterior que produce dicho cambio. En ocasiones es posible apreciar un efecto de reflexión o rebote de un corriente en una orilla. El efecto es más notable cuanto mayor es la velocidad. Además, a un ángulo de incidencia mayor, mayor ángulo de reflexión, es decir, puede hacerse la analogía con el rebote de un objeto o con la reflexión óptica. En régimen rápido ($Fr > 1$) los cambios de dirección de los contornos producen ondas permanentes, como resaltos laterales.

Con la finalidad de evitar lo más posible la presencia de corrientes secundarias se recomienda escoger como sección de medición aquella en donde se presenten trazos rectos, sin presencia de aportadores o divergencias, y separadas de los meandros del río.

5.2.1 FUERZAS QUE ACTUAN EN UNA SECCIÓN

Efecto de la Viscosidad.

El efecto de la mayor o menor viscosidad del fluido sobre las condiciones del escurrimiento se expresa por el parámetro adimensional denominado número de Reynolds.



El número de Reynolds se expresa como:

$$Re = \frac{V \cdot Rh}{\nu}$$

Donde

V : velocidad media del escurrimiento (normalmente expresado en m/s)

Rh : Radio Hidráulico (m)

ν : viscosidad cinemática, que es igual a la relación que existe entre la viscosidad dinámica o absoluta (μ), y la densidad del fluido (ρ), (expresada en P)

El número de Reynolds representa la relación existente entre las fuerzas de inercia y las fuerzas viscosas. Se dice que el flujo es laminar cuando las fuerzas viscosas son más fuertes que las de inercia. En caso contrario se denomina flujo turbulento.

El número de Reynolds que separa los escurrimientos laminares de los turbulentos se llama crítico. Si se analiza el flujo turbulento en una tubería en la que paulatinamente se fuera disminuyendo la velocidad se llegaría a un momento en que el flujo se hace laminar, esto ocurre con números de Reynolds menores o iguales a 2300. En el caso inverso, donde hubiera una tubería con flujo laminar en donde paulatinamente se incrementa la velocidad, llegaría un momento en que se presentará el flujo turbulento. En este caso no hay un valor definido, puede suceder con números de Reynolds de 5000, 10000 o superiores, en función de las perturbaciones exteriores existentes. En un canal, el número de Reynolds se encuentra alrededor de 600.

El flujo laminar se presenta con más frecuencia en los fluidos muy viscosos (aceite, petróleo). En el agua, que presenta poca viscosidad, es poco frecuente, presentándose en el flujo a través de medios porosos, sin embargo, este no es el caso de estudio de la presente tesis. El movimiento turbulento es el más frecuente en los problemas de ingeniería de ríos.

La viscosidad absoluta μ o coeficiente de viscosidad dinámica, mide la relación entre un esfuerzo y una velocidad de deformación. Sus dimensiones en el Sistema Internacional de medidas es $\text{Kg}\cdot\text{s}/\text{m}^2$.

En el sistema C.G.S. se mide en gr-masa, centímetros y segundos, siendo su unidad el poise



$$1 \text{ poise} = \frac{1 \text{ gr} - \text{masa}}{\text{cm} - \text{s}}$$

La viscosidad cinemática ν es la relación entre la viscosidad absoluta μ y la densidad ρ . Sus dimensiones son L^2T^{-1} . Su unidad es el stoke.

$$1 \text{ stoke} = 1 \text{ cm}^2 / \text{s}$$

Efecto de la gravedad.

El análisis de la mayor o menor influencia de las fuerzas gravitacionales sobre las condiciones del escurrimiento se expresa por el parámetro adimensional denominado número de Froude, el cual tiene por expresión:

$$F = \frac{V}{\sqrt{gL}}$$

Donde:

- V : Velocidad media (m/s)
- g : aceleración debida a la gravedad (m/s²)
- L : longitud característica (m)

El número de Froude se utiliza ampliamente en canales y generalmente se considera como longitud característica el tirante hidráulico d , por lo tanto

$$F = \frac{V}{\sqrt{gd}}$$

Siempre que el escurrimiento se produzca con superficie libre, habrá influencia de la gravedad sobre todo el escurrimiento.

El número de Froude representa la relación entre las fuerzas de inercia y las fuerzas gravitacionales. Valores altos en el número de Froude, $F > 1$, corresponden a pequeña influencia de la gravedad, es decir prevalece la energía cinética. Para valores menores $F < 1$ prevalece la energía potencial.

Distribución de velocidades en una sección.

El flujo que se presenta en los canales es tridimensional. En cada punto de la corriente el vector velocidad presentará componentes en las 3 direcciones.

Para analizar la variación de velocidades en una sección es necesario tomar en cuenta la forma de la sección transversal, ya que la naturaleza y características geométricas del contorno definen básicamente la curva de distribución de velocidades.

Se analiza el flujo en una tubería, el caso más simple corresponde a la sección circular, donde la influencia del contorno es simétrica y perfectamente definida. En los canales el caso más simple corresponde al análisis de un canal de ancho infinito, donde solamente se tiene la influencia del fondo del canal. En este último caso se dice que el flujo es bidimensional. En cada punto de la sección hay una velocidad particular (V_h). La velocidad es máxima en la superficie si se desprecia los efectos de la atmósfera y el aire sobre la superficie libre. En el fondo de la sección se encuentra la velocidad mínima, la cual tiende a cero. El esquema característico para la distribución de velocidades de este supuesto se representa en la ilustración 9.

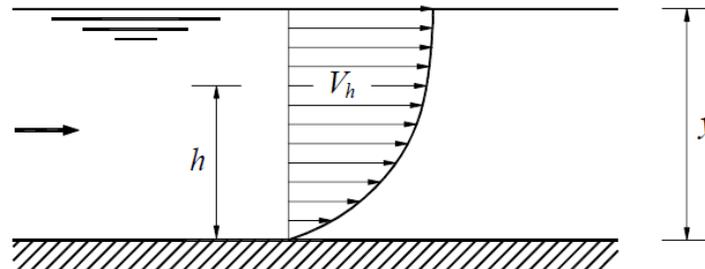


Ilustración 9. Distribución de velocidades en una sección ideal

Donde se denomina V_h a la velocidad que existe a la distancia h del contorno (en este caso la distancia que existe al fondo del canal). La curva que expresa la relación entre V_h y h se llama curva de distribución de velocidades.

Si se supone que un canal de ancho infinito, la velocidad máxima se encuentra en la superficie. Pero en un canal rectangular angosto hay una fuerte influencia de las paredes laterales y la velocidad máxima aparece debajo de la superficie. Mientras más angosto es el canal mayor es la influencia que las paredes laterales ejercen y la velocidad máxima se encuentra más profunda con respecto a la superficie. En diferentes estudios prácticos realizados se observa que la velocidad máxima puede estar comprendida entre $0.95h$ y

0.75h. Si se analiza el flujo en el interior de una tubería se encuentra la velocidad máxima en el eje central y la mínima en los contornos como se observa en la ilustración 10.

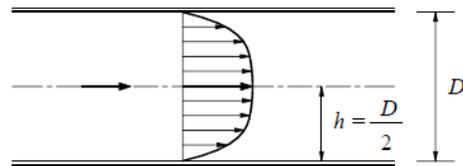


Ilustración 10. Distribución de velocidades en una tubería

La distribución de velocidades depende, entre otros factores, del grado de turbulencia. Otros factores determinantes son el grado de aspereza (rugosidad) del contorno y el alineamiento del canal.

Para números de Reynolds elevados se dice que existe turbulencia plenamente desarrollada y la distribución de velocidades tiende a hacerse uniforme, salvo en la zona próxima al contorno donde la influencia de los esfuerzos viscosos y el gradiente de velocidades es muy grande.

En una tubería que tuviese un número de Reynolds de 2×10^6 podría tenerse la siguiente distribución de velocidades, ver ilustración 11.

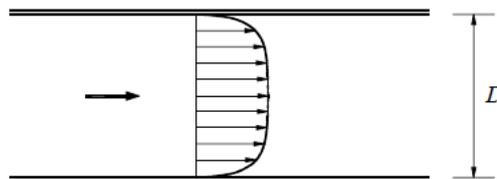


Ilustración 11. Distribución de velocidades en una tubería con un flujo con Número de Reynolds igual a 2×10^6

En cambio, en un escurrimiento laminar el gradiente de velocidades es muy grande en toda la sección transversal y se tendrá una curva de distribuciones de tipo parabólico, como se observa en la ilustración 12.

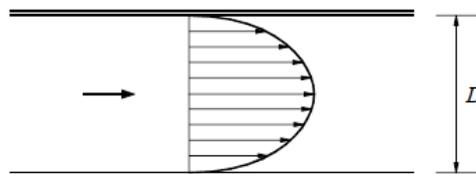


Ilustración 12. Distribución de velocidades en una tubería con flujo laminar

Para un flujo ideal, sin viscosidad, cuyo número de Reynolds sea infinito, la distribución de velocidades sería uniforme como se observa en la ilustración 13.

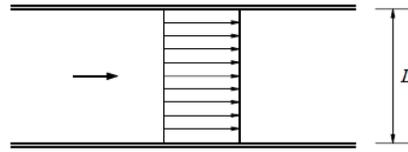
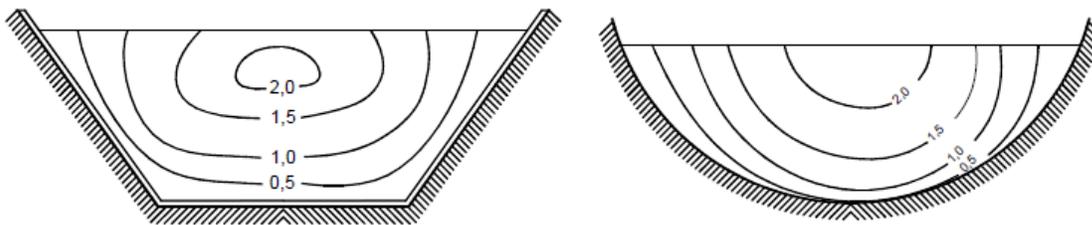


Ilustración 13. Distribución de velocidades en una tubería con flujo ideal, sin viscosidad

Es a partir de un cierto valor de número de Reynolds que se obtiene turbulencia plenamente desarrollada. Un aumento en el número de Reynolds no conlleva un aumento en el grado de turbulencia.

Anteriormente se presentó la distribución vertical de velocidades en un canal muy ancho. Este es un caso muy particular de estudio. Tratándose de canales el caso más frecuente tanto en las características del suelo como en la naturaleza es el de las secciones trapeciales o rectangulares en las que no puede dejar de considerarse la influencia de las paredes laterales, en las que la velocidad, al igual que en la plantilla, debe ser nula. Por lo tanto se tiene una distribución transversal de velocidades.

En la ilustración 14 se muestra la distribución de velocidades en una sección transversal, que es la sección de un canal en el que se ha dibujado las curvas que unen los puntos de igual velocidad (isotacas). Esta velocidad se ha relacionado con la velocidad media. Así la curva que tiene el número 2 significa que todos sus puntos tienen una velocidad igual al doble de la velocidad media.



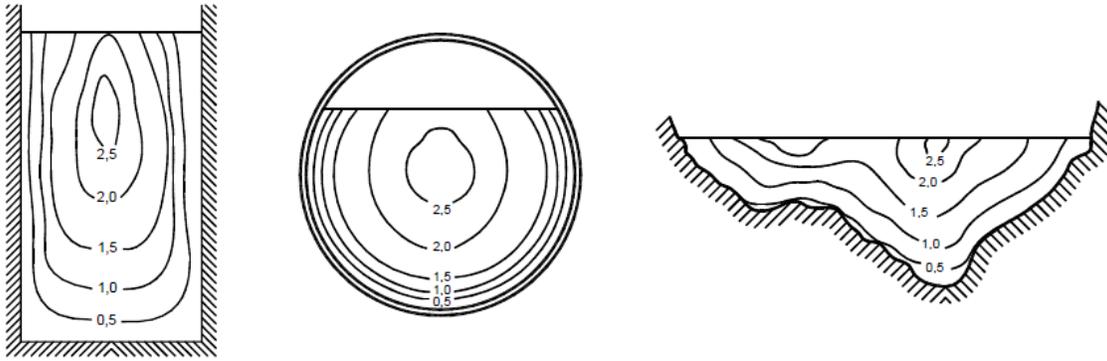


Ilustración 14. Distribución de velocidades en diferentes secciones transversales

La asimetría en la sección transversal produce corrientes secundarias, que se llaman así por no seguir la dirección general de la corriente. Si el movimiento principal es a lo largo del conducto, entonces la corriente secundaria producida por una curvatura del alineamiento se desarrolla en un plano normal y representa una circulación que al superponerse al flujo principal da lugar a un movimiento en espiral.

Cálculo de Velocidad Media por método de reducción de puntos

Para obtener la velocidad media de la subsección o dovela se sigue el procedimiento de reducción de puntos.

- Un punto de medición en la vertical. ($U=U_{0,6}$)
- Dos puntos de medición $U = 0.5 (U_{0,2} + U_{0,8})$
- Tres puntos de medición. $U= 0.25 (U_{0,2} + 2U_{0,6} + U_{0,8})$
- Cinco puntos de medición. $U= 0.1 (U_{superficie} + 3U_{0,2} + 3U_{0,6} + 2U_{0,8} + U_1)$

Cálculo del gasto con el método de sección promedio

Se mide la velocidad en los extremos de la dovela, ilustración 15. La integración del caudal se calcula con la ecuación:

$$Q = (b_{n+1} - b_n) \left(\frac{d_{n+1} + d_n}{2} \right) \left(\frac{(U_{n+1} + U_n)}{2} \right)$$

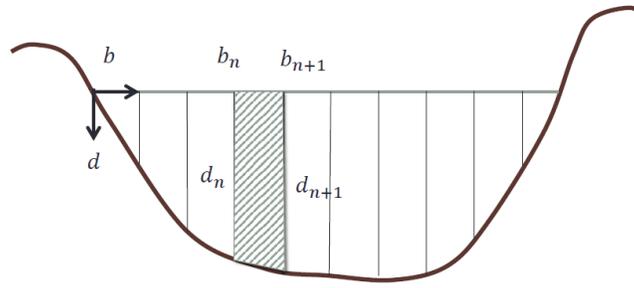


Ilustración 15. División de una sección en dovelas método sección promedio

Calculo del gasto con el método de la sección media.

Para este método se mide la velocidad en el centro de la dovela, ilustración 16.

La integración del caudal se calcula de la siguiente manera:

$$Q = \sum_{n=1}^N U_n d_n \left(\frac{b_{n+1} - b_n}{2} \right)$$

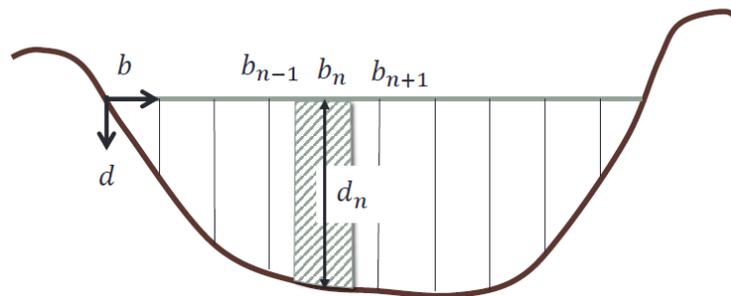


Ilustración 16. División de una sección en dovelas método sección media

Recomendaciones para una buena ejecución de mediciones.

- La sección de aforo debe encontrarse en un tramo recto, con pocas variaciones espaciales en la sección transversal.
- Se recomienda un número de seccionamiento de 20 dovelas para canales con un ancho mayor a 10 m.



- Para una medición de tipo hidrológica se acepta la medición con puntos reducidos a 0.6h o 0.2 y 0.8h.
- Se recomienda validar la calibración de los instrumentos de medición de manera periódica.
- Si las acciones se realizan de manera correcta la incertidumbre global es menos al 5%.

5.3 NORMA ISO-748:2007 (ISO748:2007, 2007).

Especifica los métodos para determinar la velocidad del agua en una sección transversal de canal abierto sin cubierta de hielo y los cálculos del caudal. Cubre métodos empleando molinetes o flotadores como instrumentos de medición de velocidad. Si bien, en muchos casos, estas mediciones intentan determinar la relación gasto-elevación de una estación de aforo, esta norma únicamente trata del procedimiento para ejecución de las mediciones de descarga. Para conocer los métodos para determinar la velocidad y área de una sección transversal del agua en canal abierto con cubierta de hielo remitirse a la ISO-9196.

El primer paso para determinar la descarga de agua en una sección transversal de canal abierto consiste en la selección y demarcación adecuada del sitio, el cual debe cumplir en medida de lo posible los siguientes requerimientos:

- a) El canal en el sitio de medición debe ser recto y mantener una uniformidad en la sección transversal y pendiente para minimizar fenómenos de distribuciones anormales de velocidad. Cuando la longitud del canal es una restricción, es recomendable para la medición con los molinetes, que el largo del canal aguas arriba sea por lo menos el doble que el tramo aguas abajo.
- b) La dirección de los flujos en todos los puntos de la vertical en la sección transversal deben permanecer paralelos y en ángulos rectos a la normal formada por la sección de medición.
- c) El fondo y márgenes del canal deben ser estables y bien definidas en todos los niveles del flujo, para facilitar la precisión de la medición de la sección transversal y



asegurar una uniformidad de condiciones durante y al momento de realizar las mediciones de caudal.

- d) Las curvas de distribución de velocidades deben ser regulares en los planos vertical y horizontal de la medición.
- e) Las condiciones del canal y sus áreas vecinas deben ser tales que se minimicen los cambios que puedan tener lugar en la distribución de velocidad durante el periodo de medición.
- f) Se deben evitar los sitios donde se presenten vórtices, flujos reversibles o puntos de estancamiento.
- g) La sección de medición debe ser claramente visible a lo ancho y sin obstrucción de árboles, plantas acuáticas y cualquier otro obstáculo.
- h) La medición desde puentes puede ser conveniente y en ocasiones la única forma de salvar la dificultad del ancho del río, su profundidad y las velocidades que presenta. Cuando se realiza la medición desde un puente con pilas sumergidas, cada medición del canal se debe medir de manera aislada. Habrá que prestar atención en la distribución de velocidad cuando las aperturas del puente presenten obstrucciones.
- i) La profundidad del agua en la sección deberá ser la suficiente en todos los niveles para proveer una inmersión adecuada de los molinetes o flotadores, dependiendo del equipo disponible a utilizar.
- j) Si la sección se va a habilitar como una estación permanente, ésta debe ser de fácil acceso en cualquier momento y deberá contar con todo el equipamiento necesario.
- k) La sección debe encontrarse alejada de bombas, caídas de agua o cualquier perturbación externa si durante su operación éstas crean inconsistencias en las condiciones del flujo.
- l) Se deben evitar sitios con flujos convergentes o divergentes.
- m) Si las mediciones se tienen que realizar en la cercanía de un puente, es preferible que éstas se realicen aguas arriba del puente. Sin embargo, en ciertos casos,



cuando la acumulación de hielo o material de arrastre cree obstáculos es aceptable que la medición se realice aguas abajo.

En el caso de equipos con elementos rotativos, molinetes electromecánicos, éstos no deberán utilizarse en aquellos puntos donde la profundidad es menor a cuatro veces el diámetro del dispositivo móvil o el cuerpo del molinete. Ninguna parte del dispositivo puede tocar la superficie del agua.

La norma menciona que los dispositivos electromagnéticos son aceptables para hacer mediciones puntuales de velocidad. Dado que estos dispositivos tienen la ventaja de no tener partes móviles y de esta forma eliminan la incertidumbre debida a la fricción y resistencia. Se debe verificar que hayan sido calibrados en el rango de velocidad para el cual van a ser utilizados y se debe conocer la precisión.

La norma establece en el apartado 7.1.5.3.7 la factibilidad de realizar la medición por el método de velocidad superficial. En el caso de condiciones de avenidas u otras donde los métodos de medición en varios puntos de la vertical no son factibles, es posible realizar la medición de únicamente un punto en la superficie. Se debe tener cuidado que las mediciones de velocidad superficial no se vean afectadas por perturbaciones aleatorias y vientos. Esta velocidad superficial será convertida a velocidad media en la vertical multiplicando el valor obtenido por un coeficiente específico determinado para la sección. Los coeficientes pueden ser computados para los distintos tirantes correlacionando la velocidad superficial con la velocidad a 0.6 de la profundidad, en aquellos casos que se desee una mayor precisión, con la velocidad media obtenida por algún otro de los métodos. Como guía general los coeficientes varían entre 0.84 y 0.9 dependiendo de la forma del perfil de velocidad. Valores entre 0.88 y 0.90 son comúnmente obtenidos cuando la plantilla no presente cambios significativos.

5.4 INCERTIDUMBRES EN LA MEDICIÓN DE FLUJO EN CORRIENTES.

Definición de incertidumbre. Todas las mediciones de magnitudes físicas son sujetos de incertidumbre. Esto puede deberse a errores sistemáticos en los equipos utilizados para calibración y medición o errores aleatorios causados por ejemplo por una variación en la sensibilidad del equipo utilizado en el momento de realizar la medición. El resultado de una medición es por lo tanto un estimado del valor real de la magnitud de esa medición y como resultado solo puede estar completo cuando viene acompañado de un análisis de esta incertidumbre.

La discrepancia entre el valor real y el valor medido es el error de medición. El error de medición, que no puede ser conocido de primera instancia, causa una incertidumbre acerca de la validez de la magnitud medida. La incertidumbre se expresa cuantitativamente como un “parámetro que caracteriza la dispersión de los valores que pueden ser razonablemente atribuibles al objeto de medición” (Joint Committee for Guides in Metrology, 2008)

El error de medición es una combinación de componentes que se presentan durante la operación de varios elementos en los procesos de medición. Para mediciones cuantitativas que a su vez dependen de varias componentes cuantitativas, el error total en la medición es la combinación de estos errores. La determinación de la incertidumbre en la medición involucra la identificación y caracterización de todos los componentes del error, cuantificación de las correspondientes incertidumbres y sus combinaciones. Las incertidumbres son combinadas utilizando reglas estadísticas para combinación de desviaciones estándar, dando una consideración apropiada a la correlación de las diferentes fuentes de errores de medición para ordenar en errores sistemáticos y aleatorios. La incertidumbre resultante se maneja entonces en términos de incertidumbres estándar, que corresponde a una desviación estándar de la probabilidad de distribución de los errores medidos.



En algunas aplicaciones es necesario expresar la incertidumbre de medición como una banda o intervalo que puede ser esperado en una fracción de la distribución de los valores que puede ser atribuible al mesurando. El intervalo es obtenido multiplicando la incertidumbre estándar por un factor, k .

De esta forma la incertidumbre puede ser presentada como incertidumbre estándar (una desviación estándar) y es expresada como un porcentaje del valor medido.

En éste tema de estudio es importante conocer las incertidumbres que los diferentes métodos pueden ofrecer, los valores de Gasto obtenidos con diferentes métodos y equipos podrán no ser exactamente iguales, se pueden presentar diferencias menores, lo cual no quiere decir que un método sea incorrecto.

Para poder realizar una medición de manera correcta es necesario analizar el nivel de incertidumbre de la misma.

Una vez determinado el objeto de medición, el principio y el procedimiento de medición se identifican las posibles fuentes de incertidumbre.

El origen de la incertidumbre son los diferentes factores que están relacionados en la medición, por ejemplo:

- Resultados de calibración del instrumento.
- Incertidumbre del patrón o material de referencia.
- Repetibilidad de las lecturas
- Reproducibilidad de las mediciones por cambio de observadores, instrumentos u otros elementos
- El modelo particular de medición
- Variaciones en las magnitudes de influencia.
- Definición incompleta del objeto de medición;
- Ejecución imperfecta de la definición del objeto de medición;
- Contar con un muestra no representativa (la muestra del objeto de medición puede no representar la definición del mismo);



- Inadecuado conocimiento efecto de las condiciones ambientales en la medición o medición imperfecta de las condiciones ambientales;
- Tendencia personal en la lectura de los equipos analógicos;
- Resolución finita de un instrumento o discriminación de dígitos;
- Valores inexactos en la medición de estándares y materiales de referencia;
- Valores inexactos de constantes y otros parámetros obtenidos de fuentes externas y utilizadas en la reducción de datos algorítmicos;
- Aproximación y suposiciones incorporados en el método de medición y procedimiento;
- Variaciones en observaciones repetidas de un mensurando bajo condiciones aparentemente idénticas.

MÉTODO DE EVALUACIÓN TIPO A (ANÁLISIS ESTADÍSTICO)

- La media aritmética de las observaciones se evalúa como:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

En este caso se tiene una serie de muestras de diferentes observaciones, bajo una misma condición de prueba:

- Dispersión de los datos o desviación estándar.

$$s^2(x_i) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$$

- Cálculo de la desviación estándar experimental (x_i)

$$\mu(q_i) = s(sx_i) = \frac{s(q_i)}{\sqrt{n}}$$



La anterior indica que al aumentar el número de repeticiones se disminuye la incertidumbre tipo A.

Método de evaluación tipo B

Considera todas las demás maneras de estimar la incertidumbre y se supone una distribución con base a la experiencia o información externa del metrologo.

- Certificados de calibración
- Experiencia o conocimiento general del entorno y propiedades relevantes de los materiales e instrumentos
- Especificaciones de los fabricantes
- Datos obtenidos de calibración y otros tipos de certificados
- Incertidumbres conocidas y referidas de datos tomados de manuales.

5.5 EQUIPOS UTILIZADOS PARA MEDICIÓN DE VELOCIDAD DEL AGUA

Un asunto de capital importancia es la sección transversal, que puede obtenerse a través de métodos topográficos o sondeos y la velocidad por medio de los diferentes tipos de dispositivos de medición.

La sección transversal de una corriente está limitada, en la parte superior por la superficie del agua, por las paredes del cauce que forman los lados y por el fondo o plantilla, por lo que es recomendable que la sección de aforo se ubique en un tramo recto del río o arroyo.

En corrientes cuyas velocidades varían desde 0.1 m/s hasta 2.5 m/s, la velocidad se puede obtener mediante el molinete; si la velocidad está por debajo del 0.1 m/s disminuye la precisión del instrumento, mientras que en velocidades superiores a los 2.5 m/s, además de las dificultades que se presenten por la fuerza de arrastre del flujo, el sensor puede ser dañado por los objetos que arrastra la corriente.

La configuración de la sección puede llevarse a cabo usando sondas, sean rígidas o flexibles. Las sondas rígidas consisten en una varilla metálica o de madera graduadas del tamaño suficiente para tocar el fondo del cauce, ver ilustración 17, midiendo de esta forma la profundidad en las secciones transversales; este tipo de sonda se emplea en ríos y arroyos cuando la corriente lleva gastos pequeños o en canales de riego, también puede aplicarse cuando la velocidad del medio no provoca un arrastre de la sonda que impida una correcta medición.



Ilustración 17. Uso de sonda rígida para medición de profundidad.



Ilustración 18. Uso de sonda flexible para medición de profundidad.

La sonda flexible está compuesta por un escandallo, que es un elemento pesado, generalmente de plomo para evitar que sea arrastrado por la corriente y con una forma especial para poner la mínima resistencia al flujo del agua, ver ilustración 198.

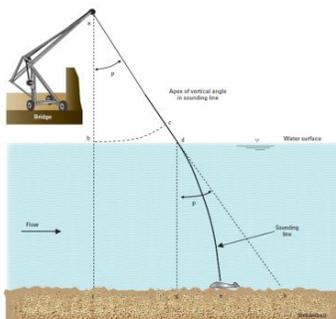


Ilustración 19. Uso de sonda flexible para medición de profundidad.

El escandallo se sujeta al extremo de un cable o cadena, similar al empleado para lastrar el molinete. Como se observa en la ilustración 19 hay una deformación debido al arrastre que presenta la corriente de agua, existen algunas ecuaciones empíricas para la corrección de este valor.

Con la configuración de la sección es posible determinar el área hidráulica.

El principio de conservación es la medición del número de partículas del fluido que se desplazan a través de una sección transversal:

$$Q = \int_s \eta \cdot v dA$$

Donde v es el vector velocidad, η el vector normal a la sección y dA la diferencial de área. S es la sección transversal de la vena líquida.

El método consiste en discretizar la sección transversal y medir en forma directa la velocidad y el área de cada sección, la sumatoria de los caudales de cada subsección es el caudal de la sección transversal.

$$Q = \sum_{i=1}^n U_i A_i$$

Donde U_i es la velocidad media en el área discreta, A_i es el área discreta.

A cada área discreta se le conoce con el nombre de dovela. Dependiendo del ancho del cauce es el número de dovelas, en que debe dividirse la sección, ver Tabla 1 2.

Tabla 2. Número de dovelas recomendado en función del ancho de la sección.

Ancho del cauce	No. Mínimo de dovelas
$b < 0.5\text{m}$	5 a 6
$0.5 < b < 1.0 \text{ m}$	6 a 7
$1 < b < 3.0 \text{ m}$	7 a 12
$3 < b < 5 \text{ m}$	13 a 16
$b > 5 \text{ m}$	20 a 22

5.5.1 Sensores electromecánicos

Los equipos utilizados en el uso de este método para la medición de la velocidad en ríos son los molinetes, ejemplos de estos equipos pueden verse en las ilustraciones 20 y 21.



Ilustración 20. Molinete tipo Price.

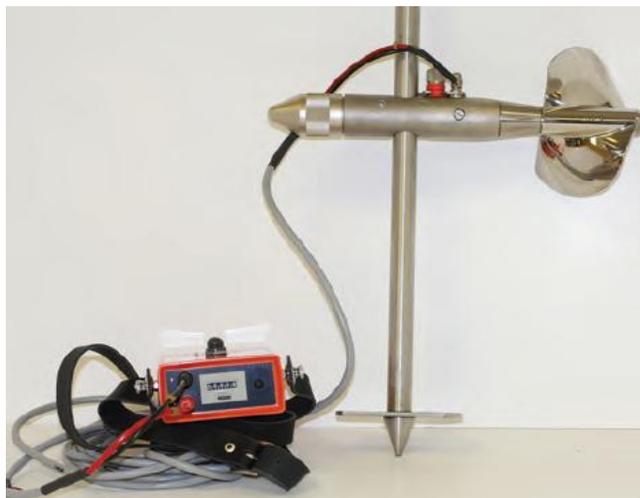


Ilustración 21. Molinete tipo hélice.



Equipos Electro-mecánicos, utilizando el principio de funcionamiento por tazas cónicas o hélices.

El principio de operación de estos equipos es relativamente sencillo. El medidor cuenta con un elemento giratorio que se coloca directamente en contacto con el flujo en el punto de medición, las revoluciones de éste elemento son proporcionales a la velocidad del flujo. Mediante un mecanismo interno el equipo registrará cada vez que se ejecute un giro completo del mecanismo móvil. El número de giros se registra de manera mecánica y es enviado de forma eléctrica a un observador o un colector de datos. A partir de una ecuación se identifica la cantidad de vueltas recorridas por unidad de tiempo (normalmente en un minuto) y a partir de ahí se obtiene la velocidad.

La velocidad que adquiere el elemento móvil al contacto con el agua se transmite a un sistema de relojería o de pulsos eléctricos que la transforman directamente en información equivalente a volúmenes o registros del caudal. Los molinetes más sencillos envían una señal de ruido cada vez que se ha ejecutado un giro completo del elemento móvil. El aforador lleva la cuenta de cuantas vueltas se han realizado a partir de unos audífonos conectados al molinete. Con estos datos y una ecuación proporcionada para cada equipo es posible hacer un cálculo de la velocidad promedio en el punto de medición. Los equipos mecánicos deben ser construidos, calibrados y recibir mantenimiento de acuerdo a la norma ISO-2537 y la ISO-3455.

Los equipos utilizan un elemento primario consistente en álabes, copas o aspas que giran dentro de las tuberías a presión o en los canales a superficie libre, debido a la acción que ejerce el flujo que pasa por estos conductos en dirección axial. Estos equipos, dado que no miden el caudal de manera directa, son considerados como medidores indirectos, ya que la medición la realizan a partir de la velocidad del flujo por el conducto.

Uno de los factores determinantes para que el equipo dé información confiable es la adecuada selección del medidor que se estará utilizando. Al momento de determinar el equipo a usar se deben de tomar en cuenta factores como los que se mencionan a continuación:

- Exactitud: Grado de aproximación que tiene una medición respecto a un valor estándar o patrón.
- Rango de medición de caudales: Los medidores tienen un rango de medición dentro del cual el equipo funciona correctamente.
- Pérdidas piezométricas: La mayoría de estos equipos provocan una pérdida de carga piezométrica, la cual puede ser considerable o despreciable en función del equipo.
- Costo. Incluye costo del equipo, instalación, accesorios, operación, capacitación al personal, mantenimiento.
- Mantenimiento. Tipo de mantenimiento requerido, periodicidad del mismo.



Ilustración 22. Ejecución de aforo por vadeo.

El uso de estos equipos se puede realizar por vadeo, ver ilustración 22 o desde una estructura de apoyo, como una canastilla de vuelo, ver ilustración 23.



Ilustración 23. Ejecución de aforo desde canastilla flotante en la estación Oxolotán.

En ambos casos se debe tener un apoyo visual para marcar los puntos donde se deberá realizar la medición.

Normalmente la medición de profundidad se realiza por medio de marcas que se tienen en las varillas de soporte del molinete.

Hoy en día existen molinetes con contadores de pulsos, ver ilustración 24, los cuales pueden venir acompañados de un sensor de profundidad para proporcionar información de la ubicación en el tirante a la que se debe colocar el molinete.



Ilustración 24. Contador OTT Z400

5.5.2 Sensores ultrasónicos y electromagnéticos.



Ilustración 25. OTT ADC

Los molinetes que utilizan efecto Doppler o electromagnético presentan la ventaja de no tener partes móviles, con lo cual se reducen los errores y mantenimiento del equipo, además de que no producen perturbaciones en el medio, en la ilustración 25 se observa como ejemplo un sensor ultrasónico OTT ADC.

Son equipos aplicables con alta precisión para la medición en diferentes anchos de la sección transversal. Presentan costos de instalación y mantenimiento relativamente bajos comparados con los equipos mecánicos tradicionales, los cuales deben ser enviados de manera periódica para mantenimiento y calibración de la ecuación de velocidad. Son sensores que pueden ser utilizados en fluidos con alta turbidez.



Ilustración 26. Uso de equipo OTT MF Pro.

En función del dispositivo de medición con el cual se cuente y las condiciones del cauce a medir, se puede realizar aforos por vadeo, ver ilustración 26, desde una estructura de soporte (canastilla colgante sobre la sección, cable de arrastre del equipo, puente; o incluso desde un vehículo motor arrastrando el equipo de medición, como en el caso de los perfiladores ultrasónicos.

5.6 Sensor de medición de velocidad superficial por radar no intrusivo

Principio de operación

El número de oscilaciones que se producen en una onda en cada segundo se llama frecuencia. Nuestros ojos son capaces de ver las ondas electromagnéticas que se producen entre 400 y 800 mil millones de oscilaciones por segundo; este tipo de frecuencias electromagnéticas reciben el nombre de luz visible. Sin embargo, las ondas utilizadas en los radares son frecuencias mucho más bajas.

Es común pensar que el radar mide el tiempo que tarda el haz electromagnético en volver a la antena, pero no es cierto. Como la velocidad de la luz es tan grande, el radar debería ser capaz de medir tiempos muy cortos, lo cual es muy difícil y costoso. En realidad, los sensores por radar se basan en el efecto Doppler.

Para entender este efecto, se tiene una fuente de emisión de un pulso con una frecuencia determinada el cual se traslada a través del agua. El pulso es reflejado por las partículas transportadas por el flujo (sedimento, materia orgánica, burbujas), estas reemiten el pulso, si la partícula se aleja del sensor se disminuye la frecuencia, en caso contrario aumenta la frecuencia, ver ilustración 27.

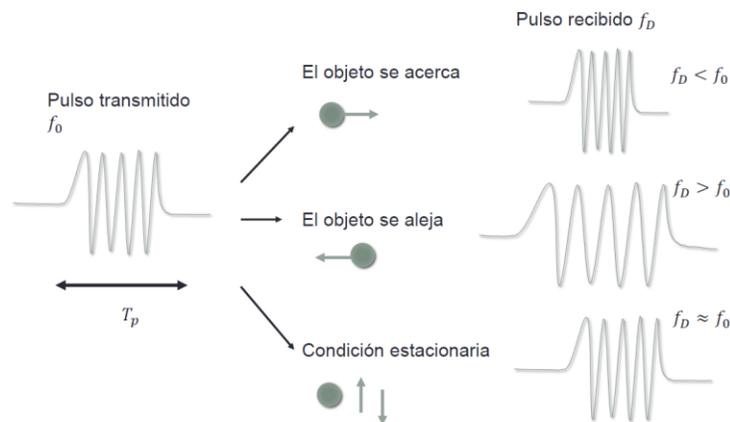


Ilustración 27. Efecto Doppler.

Todos los tipos de radar funcionan según el mismo principio básico: emiten una onda electromagnética hacia el objeto a detectar, la onda rebota y vuelve a la antena. Analizando la señal devuelta, se pueden saber muchas características del objeto en cuestión.

Las ondas electromagnéticas son oscilaciones del campo electromagnético que se propagan en línea recta a la velocidad constante de 299,792,458m/s, un poco menos de 300,000km/s.

El efecto Doppler ocurre cuando el receptor de la onda se mueve con respecto al emisor, o viceversa. Si el emisor se está moviendo, significa que cada nueva oscilación parte desde una posición ligeramente diferente. A consecuencia de esto, la distancia entre cada cresta de la onda será diferente, ver ilustración 28.

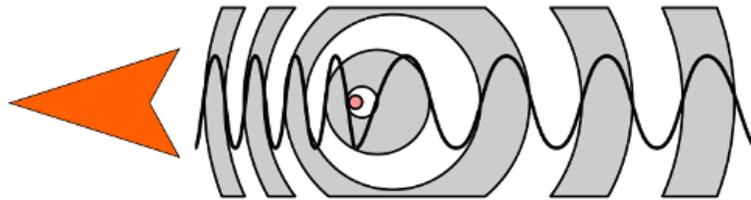


Ilustración 28. Cambio de frecuencia por efecto Doppler.

Cuando estas ondas más juntas llegan a un receptor, aparentemente la frecuencia es mayor. En cambio, las ondas emitidas en el sentido contrario de la marcha sufren el fenómeno contrario: si el emisor se aleja del receptor, la frecuencia recibida es menor. Este fenómeno ocurre con cualquier tipo de onda, como las ondas sonoras. Es muy fácil notarlo en los vehículos de alta velocidad como, ambulancias, patrullas que emiten un sonido muy agudo cuando se acercan que se convierte en grave cuando están en su punto más cercano y empiezan a alejarse.

Los sensores de efecto Doppler se basan en el principio de medir la diferencia de frecuencias. Sin embargo, medir este pequeño cambio sigue siendo muy complicado; para solucionar este dilema existe una forma de poder medir cambios muy pequeños en la frecuencia con facilidad: superponer la onda original y la reflejada. Al superponer dos

ondas, sus oscilaciones se suman y forman una única onda final. Si las dos ondas están oscilando hacia el mismo lado, entonces la onda total será el doble de grande (interferencia constructiva). Por el contrario, si las dos ondas están oscilando en direcciones opuestas, se cancelarán mutuamente y la onda final será muy pequeña (interferencia destructiva), ver ilustración 29.

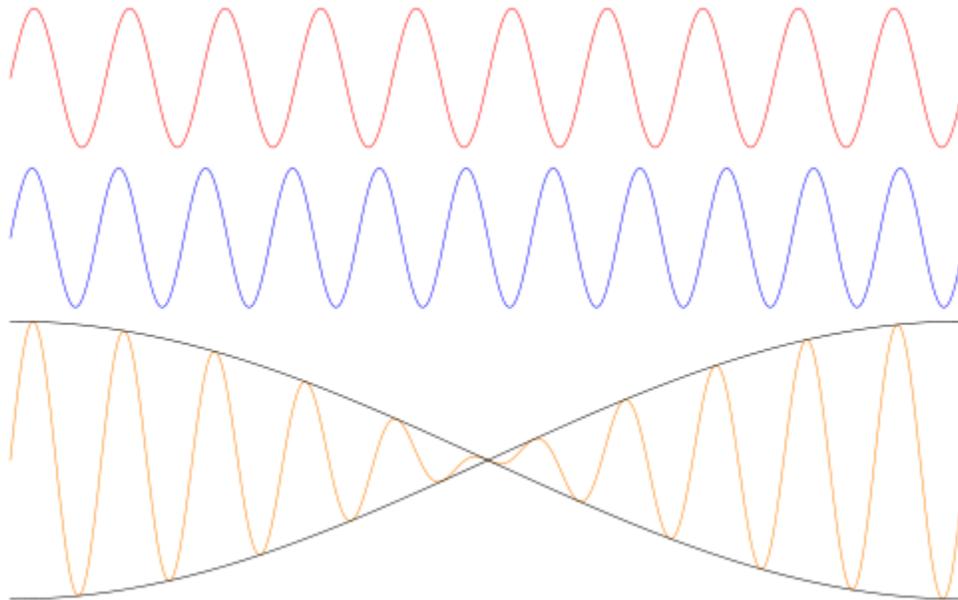


Ilustración 29. Superposición de ondas alteradas por efecto Doppler.

En el caso del radar, como las frecuencias de las dos ondas son un poco diferentes, el ritmo en que cambia la dirección de oscilación de cada una es también diferente. Las ondas empiezan oscilando ambas hacia el mismo sentido, con lo cual la onda resultante (en naranja) es mayor. No obstante, al cabo de un rato oscilarán en sentido contrario, haciendo que la onda naranja prácticamente desaparezca. Y así cíclicamente.

Esto significa que la amplitud de la onda total va cambiando con el tiempo, lo que produce pulsaciones. De nuevo, este fenómeno ocurre con todas las ondas; por ejemplo, en las ondas sonoras se utiliza para afinar instrumentos (i.e, si al superponer un diapasón calibrado con una cuerda de piano escuchamos pulsaciones, significa que la cuerda del piano no está bien afinada). Conociendo el ancho de cada pulsación, el radar puede conocer la frecuencia de la onda reflejada. Y sabiendo la frecuencia, realiza un cálculo de

la velocidad a la que se mueve el objeto de estudio. Con un equipo bien calibrado se pueden obtener mediciones de la velocidad de buena calidad.

5.6.1 Sensores de velocidad superficial del agua.

Existen diferentes sensores que utilizan la tecnología de radar para hacer una medición de velocidad superficial sin contacto con el agua. El principio de operación de estos sensores es el explicado anteriormente, algunos de los equipos que se comercializan son:

- SPR300W de Smarty Planet Arantec. Ilustración 30.

CARACTERÍSTICAS	
Tipo de radar	Banda K 24.125GHz / 24.200 GHz radar doppler
Ángulo de haz	12° Azimut, 24° elevación
Distancia de detección	Hasta 50 m
Rango de velocidad	0.02 m/s a 15m/s
Clase de protección	IP68



Ilustración 30.
SPR300W

- Q-EYE RADAR MT, RV30 y RV11. Ilustración 31.

CARACTERÍSTICAS	
Tipo de radar	24 GHz
Ángulo de haz	10° a 11°
Rango de velocidad	0.3 m/s a 15m/s
Clase de protección	IP68

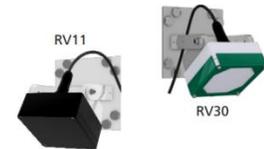


Ilustración 31. Q-EYE
RADAR MT RV30 y RV11

- RAVEN-EYE. Ilustración 32.

CARACTERÍSTICAS	
Resolución	0.001 m/s
Precisión	0.5 %
Rango de velocidad	0.15 a 9 m/s bidireccional
Clase de protección	IP68



Ilustración 32.
RAVEN-EYE

- OTT KALESTO. Ilustración 33.

CARACTERÍSTICAS	
Distancia de medición	Hasta 28.5m
Precisión	+/- 0.01m sobre el rango completo de medición.
Clase de protección	IP68



Ilustración 33. OTT
Kalesto.

- SOMMER RG30. Ilustración 34.

CARACTERÍSTICAS	
Tipo de radar	Banda K 24GHz
Resolución	1mm/s
Distancia de detección	Hasta 130m
Rango de velocidad	0.10 m/s a 15m/s bidireccional
Clase de protección	IP68



Ilustración 34.
SOMMER RG30

El equipo que se va a utilizar en el presente estudio es el SOMMER RG30 por lo que se profundiza en el uso de este sensor.

5.6.2 Características del SOMMER RG-30

El sensor de velocidad superficial del agua a utilizar será el Sommer RG30, ilustración 33. Las características generales del equipo se enuncian en la tabla 3 y las características de medición del sensor se indican en la tabla 4.

Tabla 3. Características generales de SOMMER RG30

Generales	
Consumo de energía	6...30V, protección contra voltaje inverso, protección contra sobrevoltaje
Consumo a 12V	En espera, aprox 1mA; en medición activa aprox. 140mA
Temperatura de operación	-35...60°C
Temperatura de almacenamiento	-40...60°C
Grado de protección	IP68
Grado de protección contra descargas	Protección integrada contra descargas electricas no directas con una capacidad de 0.6kW Ppp

Tabla 4. Características de medición de velocidad de SOMMER RG30

Medición de velocidad	
Rango	0.30...15m/s
Presición	±0.02m/s; ±1%
Resolución	1mm/s
Duración de la medición	5...240s
Intervalo de medición	8s...5hrs
Frecuencia de medición	24 GHz
Angulo de apertura de Radar	12°
Distancia a superficie de agua	0.50...30m
Inclinación	Calculada internamente

5.7 Relación escala-gasto

La relación escala-gasto es muy utilizada en aquellas secciones donde se tiene un solo tirante para un flujo determinado. La relación escala-gasto de la sección transversal de una corriente se puede obtener cuando se tenga un canal con flujo uniforme, o bien no exista efecto de remanso en dicho canal.

Para obtener esta relación se selecciona un tramo más o menos recto y se hacen una serie de aforos, ya sea con molinete u otro método; para cada aforos se mide la escala en el canal. Con los pares de datos escala-gasto se obtiene una ecuación empírica del tipo:

$$Q = \beta_0 h^{\beta_1}$$

Donde los parámetros β_0 y β_1 pueden obtenerse mediante el método de regresión lineal, al considerar la siguiente transformación logarítmica de la ecuación anterior:

$$\ln[Q] = \ln[\beta_0] + \beta_1 \ln[h]$$

En la tabla 5 se presenta un ejemplo en el que se ilustra el método de regresión mediante el cual se obtienen los parámetros de la ecuación empírica. Aforos realizados en el río Suchiapa (Kennedy Perez, Fragoza Díaz, Peña Peña, & Moreno Bañuelos, 1992).

Tabla 5. Aforos realizados en río Suchiapa

ESCALA h (m)	GASTO Q (m ³ /s)	Ln (h)	Ln (Q)
1.00	1.085	0.00000	0.08158
1.02	1.368	0.01980	0.31335
1.02	1.496	0.01980	0.40279
1.00	1.565	0.00000	0.44789
1.05	1.880	0.04879	0.63127
1.07	1.029	0.06766	0.70754
1.05	2.110	0.04879	0.74669
1.06	2.263	0.05827	0.81669
1.05	2.339	0.04879	0.84972
1.09	3.071	0.08618	1.12200
1.12	3.803	0.11333	1.33579
1.13	5.011	0.12222	1.61164
1.16	5.412	0.14842	1.68862
1.18	5.978	0.16551	1.78809
1.19	6.230	0.17395	1.82938
1.22	8.000	0.19885	2.07944
1.26	8.776	0.23111	2.17202
1.24	10.570	0.21511	2.35802
1.29	11.000	0.25464	2.39790
1.28	11.124	0.24686	2.40910
1.32	13.789	0.27763	2.62387
1.34	13.979	0.29267	2.63756
1.38	17.088	0.32208	2.83838
1.44	17.911	0.36464	2.88542
1.42	18.026	0.35066	2.89182
1.46	19.310	0.37844	2.96062
1.46	19.391	0.37844	2.96481

La escala tiene una cota arbitraria



Resultado de la Regresión:

Constante	$\ln[\beta_0]=0.408629$	$\beta_0=1.50475$
Desv. Est. Error de Q est		0.18517
R cuadrada		0.96377
No. de observaciones		27
Grados de libertad		25
Coeficiente de (h)		$\beta_1=7.459881$
Desv. Estandar del coef.		0.289272

Sustituyendo los valores encontrados β_1 β_1 , obtenidos mediante la regresión, se obtiene la ecuación empírica, válida únicamente para la corriente y en sección de aforos considerada; en la que el gasto (Q) está en función del tirante (h).

$$Q=1.50475(h^{7.459881})$$

La curva ajustada es únicamente válida para la sección y en el rango de aforos considerados; es decir, los gastos que se determinen mediante esta curva son confiables para valores de nivel desde 1.0m hasta 1.46m; que son los que corresponde a gastos desde 1.085m³/s hasta 19.391 m³/s, respectivamente. Fuera de estos rangos el gasto es erróneo.

Con la ecuación obtenida es posible inferir el gasto únicamente con conocer el valor de la variable independiente, el nivel medido en la escala. Hoy en día existen diferentes programas de software que permiten generar diferentes curvas (polonómicas, logarítmicas, etc) que permiten ajustar las curvas y elegir la que presenta menor error.

El uso de curvas gastos-elevación para inferir valores fuera del rango de medición es comúnmente utilizado, por lo que es importante validar que el comportamiento de la curva siga una tendencia congruente fuera de los rangos definidos.

6. MARCO DE REFERENCIA

6.1 Tipo de Investigación.

Para efectos del presente trabajo se llevó a cabo un tipo de investigación cuantitativa, mediante una serie de aforos en el Río Usumacinta, utilizando el puente Jonuta como estructura de apoyo, dicho puente se encuentra en el municipio de Jonuta, Tabasco.

6.2 Localización Zona de Estudio.

De todas las cuencas fronterizas, la cuenca del río Usumacinta es la de mayor extensión y mayor desarrollo hidrológico. Esta cuenca abarca una superficie total de más de siete millones de hectáreas, una superficie equivalente a casi todo el estado de Chiapas, quedando el 58 % en territorio de Guatemala y el resto en México. Dentro de la cuenca del Usumacinta se ubica la región de la selva Lacandona en México, y los Cuchumatanes, los Altos de Guatemala y una buena parte del Petén guatemalteco.

De los aproximadamente 950 km lineales de la frontera sur de México que hacen contacto con Guatemala y Belice, más de la mitad (550 km) se encuentran dentro de la cuenca del Usumacinta, ver ilustración 36. Si tomamos la distancia del flujo hacia la desembocadura como una definición de cuenca alta y baja, resalta que en el caso del Usumacinta, importantes porciones de la cuenca alta se encuentran principalmente en Guatemala. La parte baja de la cuenca es casi exclusivamente mexicana, lo que implica que México es el que recibe en última instancia los impactos acumulados sobre la red hidrológica de los procesos de transformación y desarrollo que ocurren en el resto de la cuenca. La cuenca del Usumacinta tiene una impresionante red hidrológica por estar en una de las regiones con más altos niveles de precipitación de toda Mesoamérica y por poseer un relieve complejo, sobre todo en las partes altas y medias en México, así como en las cabeceras en los Altos de Guatemala. Entre los cuerpos de agua lénticos de la cuenca del Usumacinta sobresalen en México los lagos de Nahá, Metzabok, Montebello, Lacanjá y Miramar, y en la parte baja los importantes humedales de Catazajá en Chiapas y Emiliano Zapata en

Tabasco; por su parte, en Guatemala se encuentran los lagos Lachuá, Petén Itza y la laguna Escondida, ilustración 35.

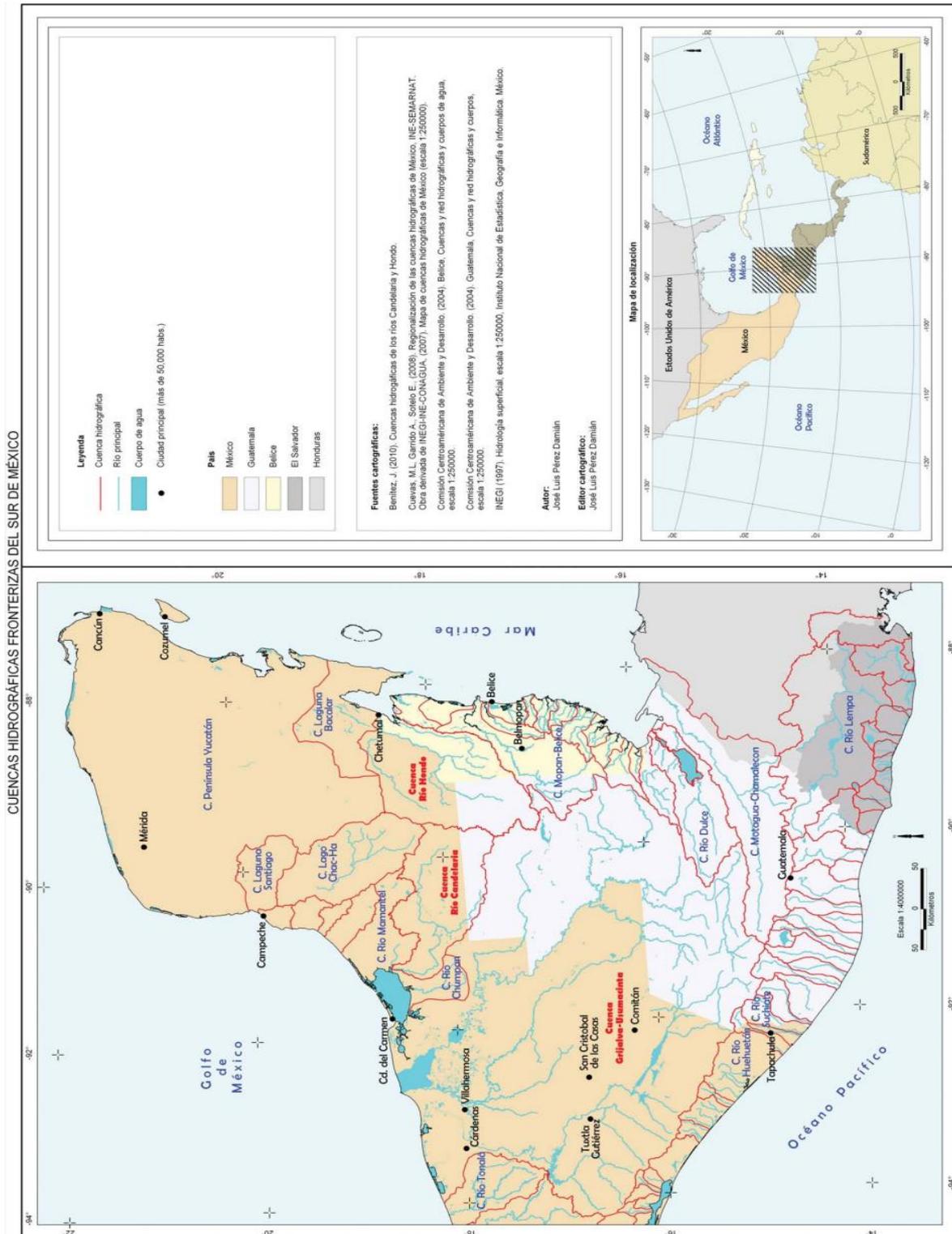


Ilustración 35. Cuencas fronterizas del Sur de México

Actualmente, la población asentada en la cuenca del río Usumacinta es de aproximadamente 1,776,232 habitantes, mayormente localizados en las partes altas de la cuenca y distribuidos en más de siete mil localidades. La dispersión poblacional es enorme; casi el 60% de la población se encuentra asentada en localidades de menos de mil habitantes. Como resulta evidente, esta dispersión poblacional hace sumamente difícil la provisión de servicios básicos de educación y salud y de infraestructura tanto en México como en Guatemala. Las mayores concentraciones poblacionales, en la sección mexicana y en la guatemalteca están ubicadas en la cuenca alta, por lo que las descargas urbanas e industriales en estas zonas tienen efecto a través de los ríos sobre el resto de la cuenca.

El sitio para la ejecución de los aforos es el Puente Jonuta, el cual atraviesa el río Usumacinta en la localidad del mismo nombre, en el Estado de Tabasco. El puente se localiza en las coordenadas 18°, 6' 1.52" N y 92° 10' 11.39" O. El acceso a este sitio es por carretera federal y no es un puente de tráfico muy pesado.

6.3 Equipo utilizado en las mediciones.

Las mediciones se realizarán con 3 equipos los cuales utilizan tecnologías diferentes. El equipo que tradicionalmente se utiliza para las mediciones es un molinete Price, en el presente caso de estudio se utiliza uno que había recibido un mantenimiento reciente y en donde se definió el factor de: 0.66 para determinar la velocidad, es decir

$$v = 0.66 \left(\frac{m}{rev} \right) * \frac{N.de\ revoluciones}{tiempo\ de\ medición\ (s)} .$$

Como segundo equipo de medición se utilizó un perfilador de barrido continuo, el cual ejecutó los aforos siendo arrastrado por una lancha en una sección a aproximadamente 50 m aguas arriba del puente.

Finalmente, el tercer equipo, cuyo funcionamiento queríamos validar, fue el sensor no intrusivo que utiliza tecnología de medición por radar SOMMER RG-30.

Las mediciones realizadas con el molinete Price y el Sensor SOMMER RG-30 se realizaron desde la estructura del puente, aguas arriba.

6.4 Descripción y configuración del SOMMER RG-30 en las mediciones.



Ilustración 36. SOMMER RG30

El SOMMER RG-30, ilustración 36, es un sensor que utiliza tecnología de radar y efecto doppler para las mediciones. Los valores medidos se obtienen por medio de una interfase RS-485 o SDI.

La medición de la velocidad se basa en el principio de cambio de frecuencia debido al efecto Doppler. El sensor de radar, cuando se encuentra instalado en una posición horizontal, apunta en un ángulo de 58° a la superficie libre del agua. El ángulo exacto es medido internamente y corregido en las mediciones de velocidad, ver ilustración 37.

Una frecuencia constante de alrededor de 24GHz es emitida. La señal es parcialmente reflejada en la superficie del agua y regresa con un cambio en la frecuencia a la antena receptora. La señal recibida es grabada y mediante mecanismos de ajuste de filtros, o sin ellos, es determinada la velocidad.

El valor medido corresponde a la velocidad superficial del flujo en el punto

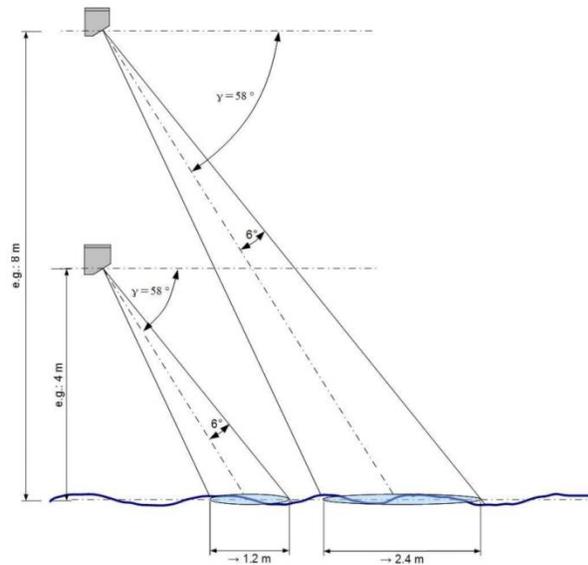


Ilustración 37. RG30 ángulo de dispersión de haz.

a donde está dirigido el haz del radar. Es esencial que exista una ligera perturbación en la superficie del agua, por ejemplo, en forma de olas, solamente de esta forma la señal podrá ser reflejada y la velocidad determinada.

El valor mínimo medible de velocidad del fluido es de 0.15 m/s, pero esto dependerá también de las condiciones de perturbación presentes en la superficie.

Para una correcta colocación del sensor es importante que el campo de medición se localice en un punto representativo del canal y no se vea afectado por la presencia de vegetación o árboles cercanos que por efecto del viento obstruyan la emisión del haz.

El Sommer RG-30 presenta diferentes posibilidades de operación. Las posibles conexiones básicas son mencionadas a continuación.

Los parámetros de configuración para la conexión del RG-30 con el protocolo de comunicación RS-485 se describen en la tabla 6.

Tabla 6. Parámetros de configuración de RG30 para uso con interface RS-485

Frecuencia de pulsos	9600
Data bits	8
Paridad	Ninguna
Bit de parada	1
Control de flujo	Ninguno

Parametrización con un equipo de cómputo conectado.

Para una parametrización con el RQCommander light o el terminal programa se necesita conectar los dos cables de la interface RS-485 con la computadora, ver ilustración 38. Debido a que las portátiles no cuentan con una interface RS-485 es necesario contar con un convertidor para conectividad a interface USB, ilustración 39.

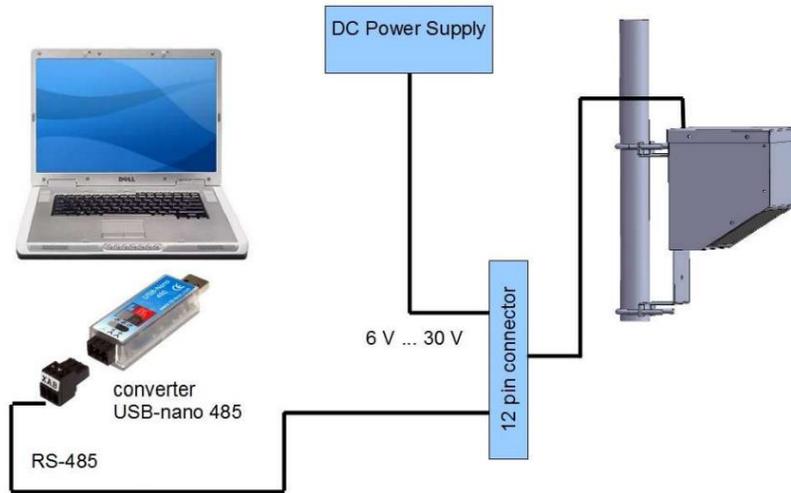


Ilustración 38. Conectividad de RG30 a PC.

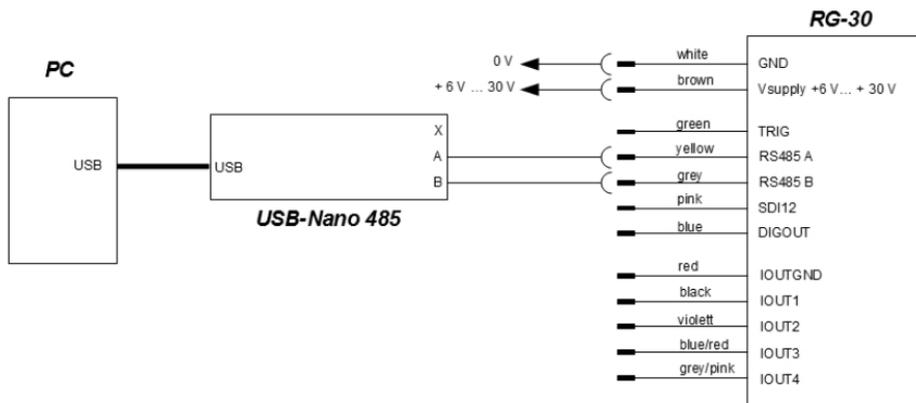


Ilustración 39. Diagrama de conexión de RG30 a PC con interface RS-485.

En caso de no contar con el convertidor es posible realizar una conectividad a interface RS-232, ver ilustración 40.

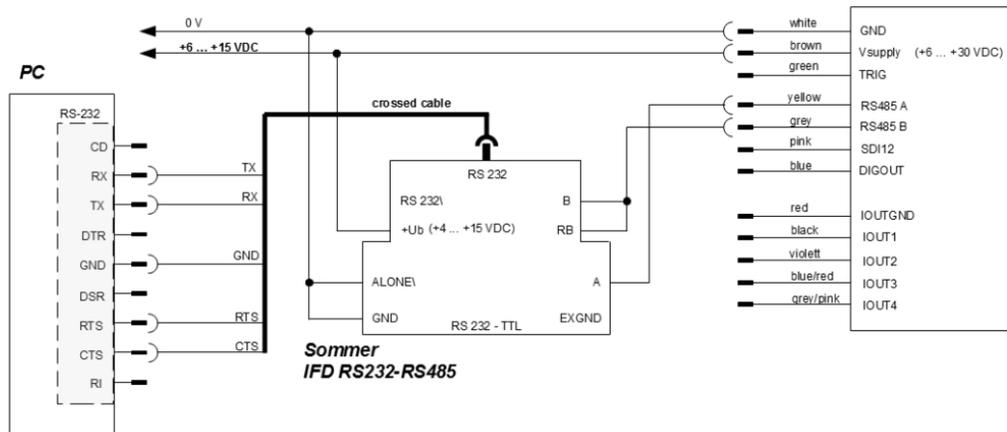


Ilustración 40. Diagrama de conexión de RG30 a PC con interface RS-232.

En caso de requerirse la conectividad a un Datalogger se puede realizar utilizando la interface RS-485, de acuerdo al diagrama de la ilustración 41.

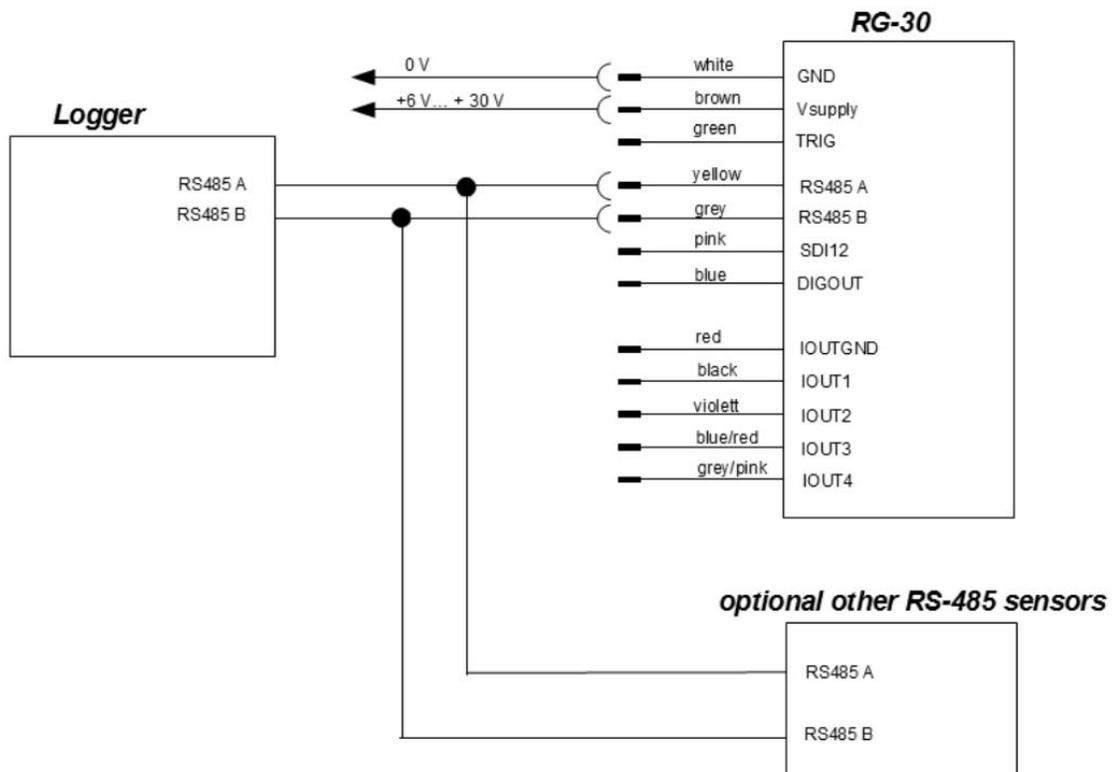


Ilustración 41. Conexión del RG30 a Datalogger por interface RS-485.

En la ilustración 42 se muestra el diagrama de conectividad para interface SI-12 del Datalogger.

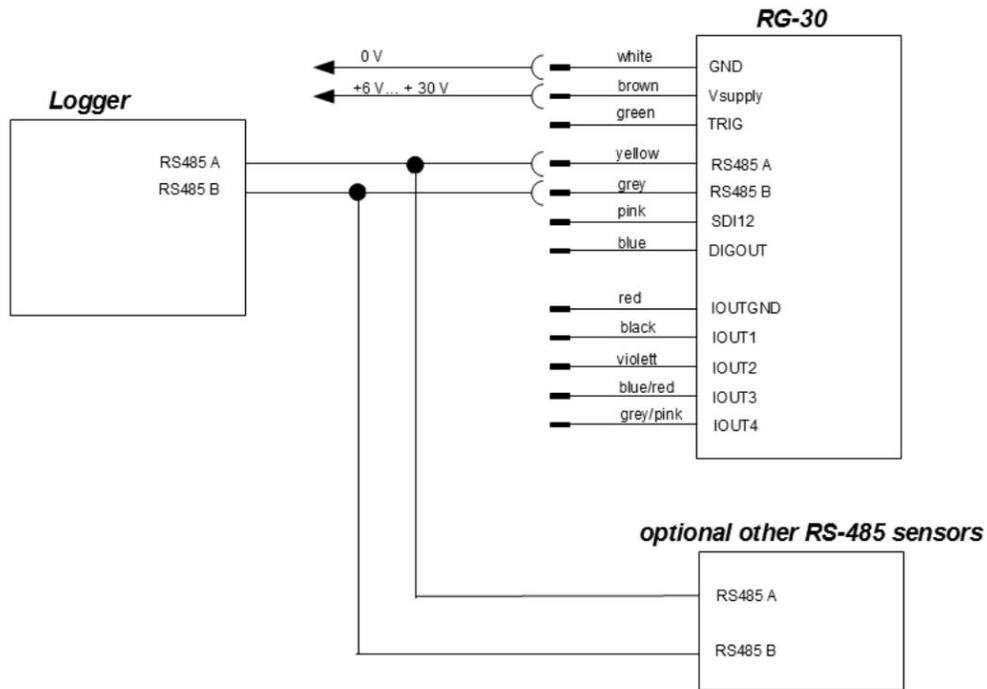


Ilustración 42. Conexión del RG30 a Datalogger por interface SDI-12.

Uso de los parámetros del SOMMER RG-30 utilizando el terminal program.

Las mediciones se ejecutaron usando la aplicación Hyperterminal del sistema operativo Windows, con este programa se puede tener control total sobre la parametrización del RG-30.

También es posible utilizar el software RQCommander light el cual fue desarrollado por Sommer Measurement System Technology.

En el uso de cualquier terminal program la primera acción es ajustar las opciones de interface. Solamente después de haber realizado el ajuste correcto aparecerá el menú principal del programa. Si el sensor se encuentra en modalidad “sleep” es posible que se tengan que repetir los pasos anteriores para entrar al menú principal.

7. CÁLCULOS Y PROCEDIMIENTOS

7.1 Protocolo de Pruebas.

Se realizaron un total de 20 aforos en el periodo del 27 de mayo al 4 de julio del 2016, con la finalidad de tener variaciones en el caudal.

Para la ejecución de aforos desde el puente se dividió el mismo en 24 secciones, cuidando que ninguna coincidiera con las pilas de los puentes, se pusieron marcas en el puente para que las mediciones se ejecutaran en los mismos puntos. Mediante técnicas de sondeo, utilizando un escandallo, se realizaron mediciones para definir la profundidad en cada una de las dovelas, actividad que se repitió en cada aforo ejecutado.

Los datos obtenidos con el sensor de velocidad superficial Doppler son comparados con aquellos obtenidos con el molinete Price y los valores totales a su vez son comparados con las mediciones realizadas mediante el uso del perfilador Doppler acústicos.

Para la medición de velocidad superficial con el sensor SOMMER RG-30 se programó el equipo para hacer mediciones de 20s de duración.

Para el cálculo del aforo con el molinete price se usó el método de sección central, tomando medidas a 2/10 y 8/10 de profundidad.

$$v_{media} = \frac{v_{2/10} + v_{8/10}}{2}$$

Los valores de profundidad se realizaron 6 metros antes y seis metros después del punto de medición, cada dovela tenía un ancho de 12m, y la sección se dividió en 24 dovelas de esta forma los puntos de medición no coincidían directamente con las pilas de soporte del puente.

Se analizaron los valores obtenidos en las mediciones, observando que el coeficiente a aplicar a la velocidad superficial para deducir la velocidad media es $k=0.9$. Este valor fue calculado con los valores obtenidos en las mediciones a 2/10 y 8/10 y comparados con valores a velocidad superficial, una vez determinado este coeficiente se utilizó para todo

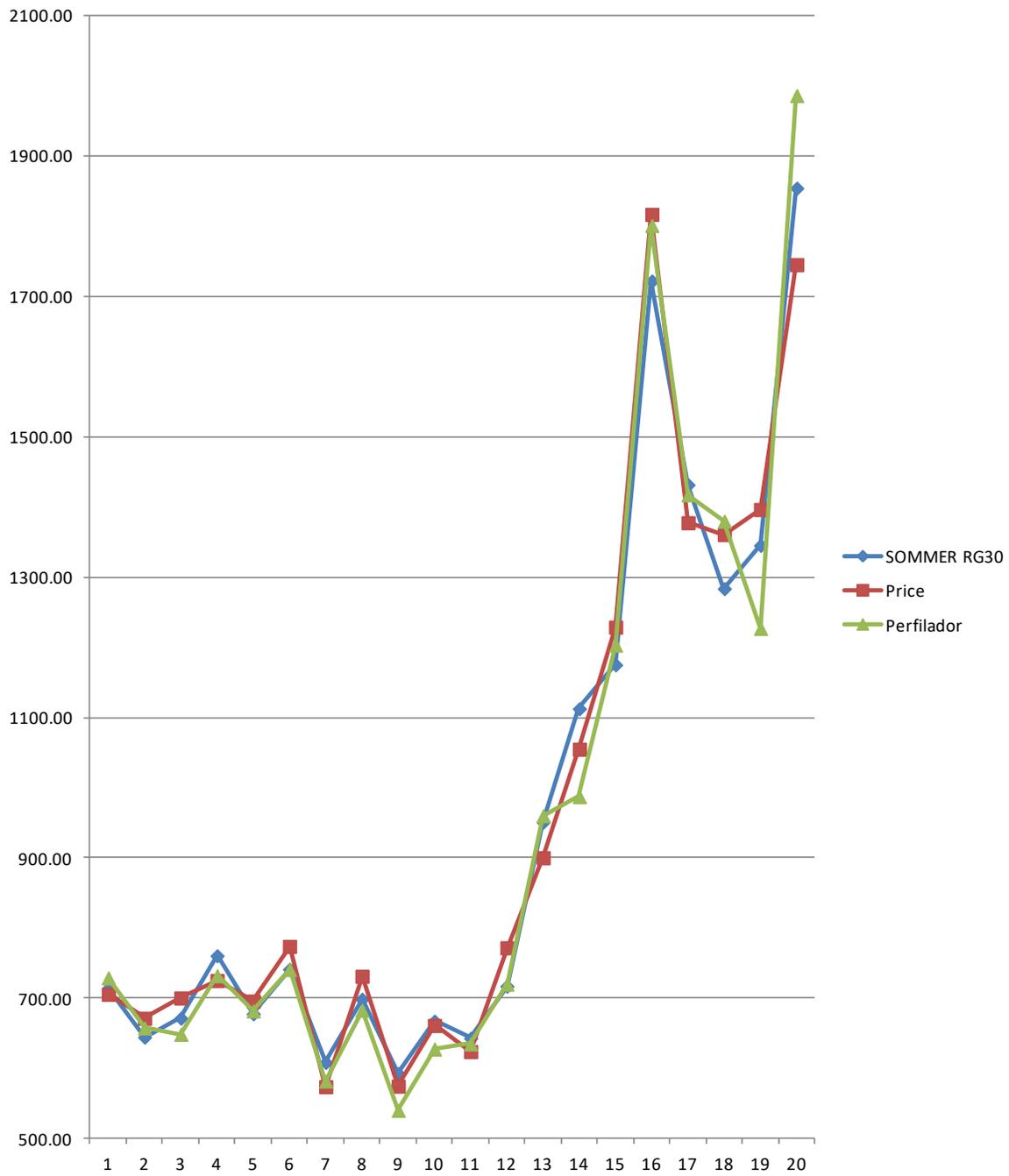
el análisis. Al final se realizó un comparativo de todos los datos obtenidos para validar el coeficiente.

Con las mediciones realizadas es que se construyeron las tablas (Anexos 1 a 4) donde se incluye toda la información de los datos obtenidos en los aforos. En el Anexo 1 se muestran los resultados de los aforos realizados con el sensor de velocidad superficial SOMMER RG-30. En el Anexo 2 se presentan las tablas con la información de los valores obtenidos al realizar los aforos con molinete price. En el anexo 3 se presenta un resumen de los 20 aforos realizados con el perfilador acústico Doppler.

El resumen de datos obtenidos es el que se muestra en la tabla 7. En la gráfica 1 están representados los valores obtenidos en cada uno de los diferentes aforos por las 3 tecnologías utilizadas.

Tabla 7. Resumen de aforos realizados con Sensor de velocidad superficial SOMMER RG-30, Molinete price, perfilador acústico Doppler

No. de aforo	Fecha de aforo	Gasto (m ³ /s) obtenido con		
		Sensor superficial SOMMER RG-30	Molinete Price	Perfilador acústico
1	02/05/2016	714.01	705.58	728.99
2	05/05/2016	644.47	671.40	657.58
3	07/05/2016	671.47	700.28	648.6
4	08/05/2016	760.55	725.15	732.07
5	09/05/2016	677.74	695.96	681.87
6	14/05/2016	741.19	773.81	741.03
7	20/05/2016	608.48	573.87	581.97
8	22/05/2016	698.52	731.23	682.86
9	27/05/2016	592.54	574.65	540.16
10	04/06/2016	667.33	661.16	627.66
11	08/06/2016	642.90	624.03	634.8
12	10/06/2016	717.12	771.96	719.92
13	11/06/2016	951.09	900.23	960.2
14	13/06/2016	1112.68	1054.98	987.29
15	15/06/2016	1175.23	1228.96	1203.28
16	22/06/2016	1722.35	1817.35	1801.48
17	25/06/2016	1431.89	1377.83	1417.7
18	27/06/2016	1283.85	1360.92	1380.02
19	01/07/2016	1345.44	1396.66	1227.11
20	04/07/2016	1854.75	1745.66	1986.7



Gráfica 1. Relación de aforos realizados con Sensor de velocidad superficial SOMMER RG-30, Molinete price, perfilador acústico Doppler

7.2 Análisis de error relativo por aforo.

Con los datos obtenidos por las tres tecnologías se obtiene un gasto medio en cada uno de los aforos obtenidos para analizar la dispersión de datos considerando

$$Q_m = \frac{(Q_1 + Q_2 + Q_3)}{3}$$

Donde Q_1 es el gasto obtenido por medio del sensor de velocidad superficial SOMMER RG-30, Q_2 es el gasto obtenido por medio del molinete price y Q_3 es el gasto obtenido por medio del perfilador acústico Doppler.

El error relativo para cada aforo se obtiene por la diferencia que existe hacia el Gasto medio calculado.

$$\varepsilon\% = \left| \frac{Q - Q_m}{Q_m} \right|$$

El resultado se muestra en la tabla 8.

Tabla 8 Distribución de gastos en cada aforo realizado.

Número de aforo	Gasto (m ³ /s) obtenido con			Gasto medio (m ³ /s)	SOMMER RG-30		Molinete Price		Perfilador acústico	
	Sensor superficial SOMMER RG-30	Molinete Price	Perfilador acústico		Diferencia respecto a la media (m ³ /s)	Diferencia respecto a la media en %	Diferencia respecto a la media (m ³ /s)	Diferencia respecto a la media en %	Diferencia respecto a la media (m ³ /s)	Diferencia respecto a la media en %
1	714.01	705.58	728.99	716.19	2.18	0.30	10.61	1.48	12.80	1.79
2	644.47	671.40	657.58	657.82	13.35	2.03	13.58	2.06	0.24	0.04
3	671.47	700.28	648.6	673.45	1.98	0.29	26.83	3.98	24.85	3.69
4	760.55	725.15	732.07	739.26	21.29	2.88	14.11	1.91	7.19	0.97
5	677.74	695.96	681.87	685.19	7.45	1.09	10.77	1.57	3.32	0.48
6	741.19	773.81	741.03	752.01	10.82	1.44	21.80	2.90	10.98	1.46
7	608.48	573.87	581.97	588.11	20.37	3.46	14.24	2.42	6.14	1.04
8	698.52	731.23	682.86	704.20	5.68	0.81	27.03	3.84	21.34	3.03
9	592.54	574.65	540.16	569.12	23.42	4.12	5.53	0.97	28.96	5.09
10	667.33	661.16	627.66	652.05	15.28	2.34	9.11	1.40	24.39	3.74
11	642.90	624.03	634.8	633.91	8.99	1.42	9.88	1.56	0.89	0.14
12	717.12	771.96	719.92	736.33	19.21	2.61	35.63	4.84	16.41	2.23
13	951.09	900.23	960.2	937.17	13.92	1.48	36.94	3.94	23.03	2.46
14	1112.68	1054.98	987.29	1051.65	61.03	5.80	3.33	0.32	64.36	6.12
15	1175.23	1228.96	1203.28	1202.49	27.26	2.27	26.47	2.20	0.79	0.07
16	1722.35	1817.35	1801.48	1780.39	58.04	3.26	36.96	2.08	21.09	1.18
17	1431.89	1377.83	1417.7	1409.14	22.75	1.61	31.31	2.22	8.56	0.61
18	1283.85	1360.92	1380.02	1341.60	57.75	4.30	19.32	1.44	38.42	2.86
19	1345.44	1396.66	1227.11	1323.07	22.37	1.69	73.59	5.56	95.96	7.25
20	1854.75	1745.66	1986.7	1862.37	7.62	0.41	116.71	6.27	124.33	6.68

Se observa que en ninguno de los casos la diferencia respecto a una media es mayor al 10%. Es decir, los valores obtenidos se encuentran dentro del grado de error aceptado de la medición, considerando la suma de incertidumbres de las mediciones.

Se realizó un análisis, para cada aforo, dovela por dovela, de la diferencia de velocidades registradas en las mediciones hechas con el molinete price y el sensor de velocidad superficial SOMMER RG-30. El perfilador de barrido continuo entrega un total de la medición realizada, por lo que no es posible hacer una comparación de velocidades por dovela con este método, además de que el uso de este equipo aún no está validado bajo una certificación oficial ISO, sin embargo en la tabla 8 se observa que los valores obtenidos se encuentran dentro del margen de aceptación.

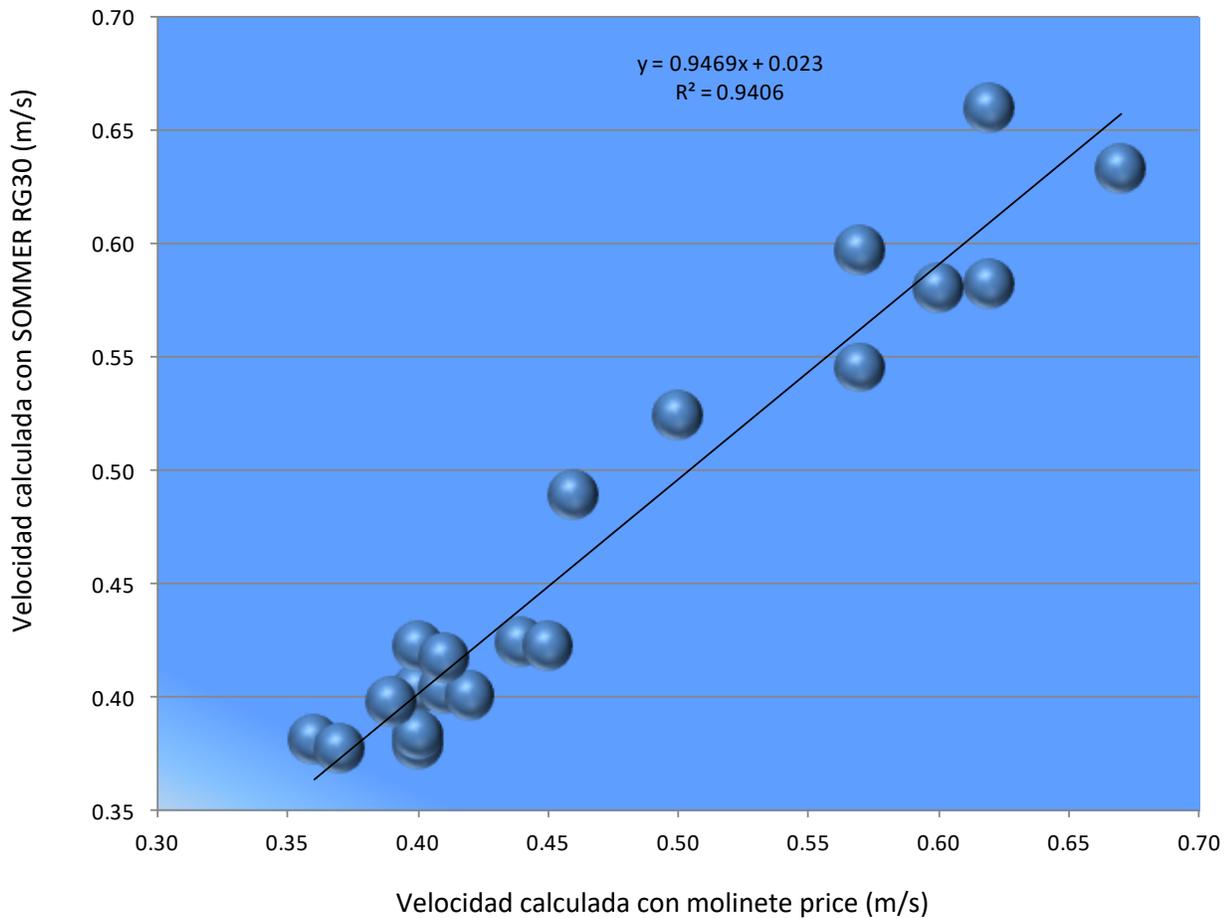
7.3 Análisis de diferencia de velocidades medias por sección.

Tabla 9. Relación de velocidades medias con los aforos realizados con molinete price y el sensor de velocidad superficial SOMMER RG-30

No de Aforo	Fecha de ejecución	Relación de velocidades	
		Velocidad media medida con molinete price (m/s)	Velocidad media medida con RG-30 (m/s)
1	02/05/2016	0.40	0.40
2	05/05/2016	0.40	0.38
3	07/05/2016	0.40	0.38
4	08/05/2016	0.40	0.42
5	09/05/2016	0.41	0.40
6	14/05/2016	0.44	0.42
7	20/05/2016	0.36	0.38
8	22/05/2016	0.42	0.40
9	27/05/2016	0.37	0.38
10	04/06/2016	0.41	0.42
11	08/06/2016	0.39	0.40
12	10/06/2016	0.45	0.42
13	11/06/2016	0.46	0.49
14	13/06/2016	0.50	0.52
15	15/06/2016	0.57	0.55
16	22/06/2016	0.67	0.63
17	25/06/2016	0.57	0.60
18	27/06/2016	0.62	0.58
19	01/07/2016	0.60	0.58
20	04/07/2016	0.62	0.66

En la tabla 9 se muestra la relación de velocidades obtenidas con los aforos realizados con el molinete price y el sensor de velocidad superficial SOMMER RG-30. Se observa que hay una tendencia lineal en los datos, los cuales si bien no coinciden a la perfección si se encuentran dentro del rango de valor aceptado, considerando que cada método presenta una incertidumbre intrínseca del 5%.

Gráfica 2. Relación de velocidades medias con los aforos realizados con molinete price y el sensor de velocidad superficial SOMMER RG-30



Lo anterior se presenta en forma de la gráfica 2, donde se observa la tendencia lineal de las dispersiones de velocidades con un error cuadrático de 0.9406, valor que es aceptable.

El análisis a detalle del error relativo de velocidades en cada una de las dovelas comparando el valor obtenido por el sensor de velocidad superficial y el molinete price se muestra en el Anexo 4, donde se observa una tendencia en cada una de las gráficas.

8. ANÁLISIS DE RESULTADOS.

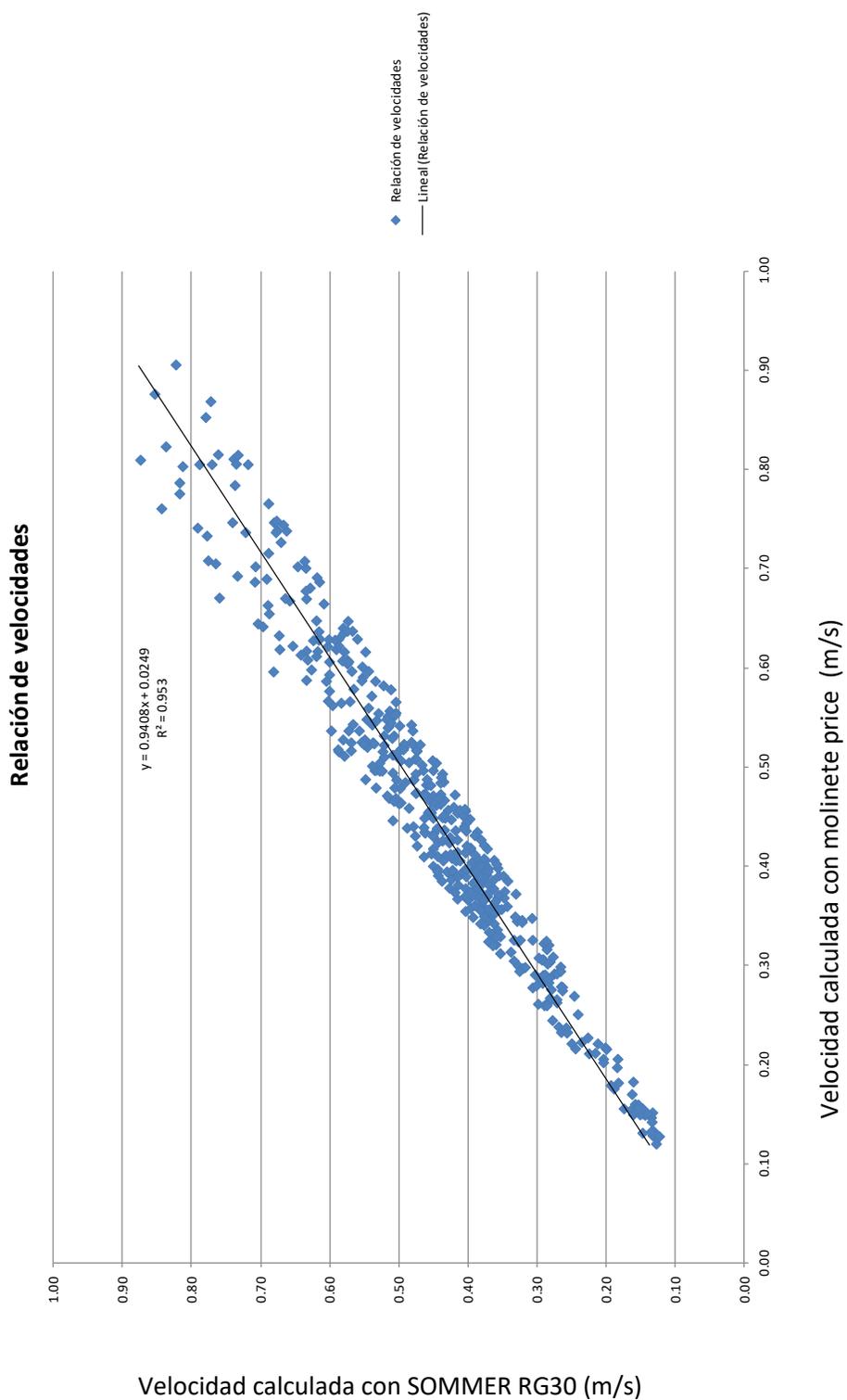
En el trabajo de investigación se realizaron veinte aforos utilizando tres técnicas diferentes e el río asumancinta , puente jonuta : por medio de un sensor de velocidad superficial tipo radar SOMMER RG-30, molinete price y un perfilador acústico Doppler. Tanto el sensor de velocidad superficial SOMMER RG-30 como el molinete price entregaban velocidades en los puntos de medición, la profundidad y el cálculo del área de la dovela se realizó mediante sondeo con un escandallo. En el caso del perfilador acústico Doppler este equipo fue montado en un flotador y arrastrado por medio de una lancha, el valor obtenido fue el resultado de la medición realizada en la sección recorrida.

Se determinó la relación existente entre velocidad media y velocidad superficial, para ello se tomaron los datos de los dos primeros aforos y se llegó a un valor medio de $k=0.90$, coeficiente que se utilizó durante todo el análisis y que al final fue comprobado para determinar la dispersión que existía para validar este coeficiente (k). Un valor más exacto es $K=0.902$ sin embargo durante todo el análisis se utilizaron dos decimales, por lo que se decidió continuar con este formato, además de que la mejora en el cálculo de dispersión al ocupar $k=0.902$ en vez de $k=0.90$ no es significativa.

Se realizó un análisis de los valores de gasto generados en cada uno de los dos aforos con las tres tecnologías propuestas, observando que el error promedio para las mediciones realizadas con el sensor de velocidad superficial SOMMER RG-30 es $\varepsilon_{m\ RG30} = 1.86\%$. La diferencia máxima se presenta en el aforo 14 con un valor de $\varepsilon_{RG30} = 5.80\%$, valor que aun así es aceptable por la suma de incertidumbres que presenta el método.

Se realizó un análisis de dispersión de datos de manera individual para cada una de las mediciones realizadas en cada uno de los aforos ejecutados con el sensor de velocidad superficial SOMMER RG30 y el molinete Price, los resultados de este análisis, cuyo detalle se muestra en el anexo 4, demuestran una tendencia lineal en los datos medidos como se observa en la gráfica 3, donde también se calculó el valor del error cuadrático siendo éste de $R^2=0.953$, valor que es aceptable por lo que se valida el procedimiento de medición.

Gráfica 3. Dispersión de velocidades calculadas con el Sensor de velocidad superficial Sommer RG30 y el molinete price



9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

El presente trabajo ha permitido validar el uso de un sensor de velocidad superficial con tecnología de radar como equipo de apoyo para realizar mediciones de caudal, el error medio presentado al utilizar esta tecnología, comparando los valores obtenidos por molinete price y el perfilador acústico Doppler es de 1.86%.

La ventaja de este equipo es que no es intrusivo, es decir no está en contacto directo con el flujo. Los molinetes y perfiladores acústicos Doppler son equipos intrusivos y están en contacto directo. Las mediciones realizadas con estos equipos fueron posibles ya que no se tenían velocidades mayores a 1.5 m/s, donde se dificulta el uso de una lancha para el arrastre del perfilador acústico Doppler, y por el arrastre de sólidos que trae la corriente, la inmersión del molinete hace que exista la posibilidad de daño al equipo por impacto.

Las mediciones fueron realizadas desde un puente como infraestructura de apoyo, sin embargo el principal beneficio de este equipo es donde se requiera realizar mediciones y la sección no cuente con infraestructuras que permitan cruzar el río. Mediante el presente estudio se buscó el validar el uso de un sensor de velocidad superficial del agua como instrumento de medición para el cálculo del caudal en una sección, el siguiente paso será el montaje del equipo en un Vehículo volador no tripulado (dron). Los avances tecnológicos en el diseño de estos equipos los convierten en una herramienta ideal para ser utilizados en las mediciones, en el Anexo 5 se describe el principio de operación de estos equipos. Mediante software ya integrado en el vehículo se puede diseñar un patrón de vuelo deteniéndose en los puntos de medición previamente establecidos. Desgraciadamente este proceso solo realiza la medición de velocidad, no hace un cálculo de profundidades para determinar el área de las dovelas y, en su caso, validar que el fondo no haya sufrido cambios en el transcurso de una avenida. Las medidas de profundidades para determinar el área hidráulica deben ser realizadas previamente y es importante considerar que los materiales de fondo y talud de la sección de estudio no sean de fácil arrastre.

Actualmente, en aquellos casos donde no es posible la ejecución de un aforo por tener caudales grandes pero que se cuenta con aforos en caudales menores, se construye la curva gasto-elevación y se extrapolan los datos. Una medición realizada por medio del sensor de velocidad no intrusivo en las subsecciones establecidas ayudaría a validar la información de las curvas gasto elevación.

El uso de vehículos voladores no tripulados está regido por la legislación actual establecida por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes para aeronáutica civil en México



(SCTMEXICO, 2017). En la Anexo 6 se describen los requerimientos para el uso de estos equipos.



AFORO REALIZADO EL 22 DE MAYO 2016 UTILIZANDO SENSOR DE VELOCIDAD SUPERFICIAL SOMMER RG-30

Punto de medición	Profundidad	Velocidad Superficial	Tiempo de medición	Factor k	Velocidad media	Ancho de sección	Profundidad media de la dovola	Area dovola	Gasto parcial
1	1.31	0.150	00:00:20	0.9	0.135	12.00	0.66	7.88	1.064
2	2.18	0.293	00:00:20	0.9	0.264	12.00	2.18	26.15	6.895
3	4.33	0.302	00:00:20	0.9	0.272	12.00	4.33	51.94	14.116
4	3.79	0.382	00:00:20	0.9	0.344	12.00	3.79	45.46	15.628
5	4.40	0.412	00:00:20	0.9	0.371	12.00	4.40	52.74	19.556
6	5.85	0.431	00:00:20	0.9	0.388	12.00	5.85	70.25	27.249
7	6.92	0.432	00:00:20	0.9	0.389	12.00	6.92	82.98	32.263
8	7.09	0.574	00:00:20	0.9	0.517	12.00	7.09	85.12	43.971
9	6.26	0.505	00:00:20	0.9	0.455	12.00	6.26	75.16	34.158
10	5.19	0.441	00:00:20	0.9	0.397	12.00	5.19	62.27	24.714
11	5.01	0.402	00:00:20	0.9	0.362	12.00	5.01	60.12	21.751
12	6.41	0.464	00:00:20	0.9	0.418	12.00	6.41	76.92	32.122
13	8.10	0.437	00:00:20	0.9	0.393	12.00	8.10	97.14	38.205
14	6.88	0.447	00:00:20	0.9	0.402	12.00	6.88	82.58	33.224
15	7.48	0.439	00:00:20	0.9	0.395	12.00	7.48	89.72	35.450
16	6.39	0.475	00:00:20	0.9	0.428	12.00	6.39	76.64	32.765
17	7.20	0.549	00:00:20	0.9	0.494	12.00	7.20	86.41	42.696
18	6.11	0.610	00:00:20	0.9	0.549	12.00	6.11	73.30	40.240
19	9.19	0.569	00:00:20	0.9	0.512	12.00	9.19	110.23	56.450
20	9.34	0.527	00:00:20	0.9	0.474	12.00	9.34	112.12	53.177
21	6.40	0.427	00:00:20	0.9	0.384	12.00	6.40	76.74	29.491
22	6.92	0.342	00:00:20	0.9	0.308	12.00	6.92	82.98	25.541
23	9.44	0.296	00:00:20	0.9	0.266	12.00	9.44	113.23	30.165
24	4.13	0.171	00:00:20	0.9	0.154	24.00	2.06	49.55	7.625
								1747.61	698.516

Calculo realizado con SOMMER RG-30

Area hidráulica	1747.61
Velocidad media	0.400
Gasto	698.516

Tabla 16. Aforo realizado el 22 de mayo 2016 utilizando sensor de velocidad superficial SOMMER RG-30



MAESTRÍA EN INGENIERÍA



AFORO REALIZADO EL 11 DE JUNIO 2016 UTILIZANDO SENSOR DE VELOCIDAD SUPERFICIAL SOMMER RG-30

Punto de medición	Profundidad	Velocidad Superficial	Tiempo de medición	Factor k	Velocidad media	Ancho de sección	Profundidad media de la dovola	Area dovola	Gasto parcial
1	1.75	0.179	00:00:20	0.9	0.161	12.00	0.88	10.51	1.693
2	3.09	0.371	00:00:20	0.9	0.334	12.00	3.09	37.08	12.381
3	5.09	0.405	00:00:20	0.9	0.365	12.00	5.09	61.04	22.251
4	4.89	0.494	00:00:20	0.9	0.445	12.00	4.89	58.73	26.110
5	5.07	0.494	00:00:20	0.9	0.445	12.00	5.07	60.82	27.039
6	6.41	0.543	00:00:20	0.9	0.489	12.00	6.41	76.86	37.561
7	7.47	0.566	00:00:20	0.9	0.509	12.00	7.47	89.64	45.663
8	7.63	0.687	00:00:20	0.9	0.618	12.00	7.63	91.56	56.612
9	6.90	0.630	00:00:20	0.9	0.567	12.00	6.90	82.81	46.954
10	5.91	0.501	00:00:20	0.9	0.451	12.00	5.91	70.97	31.999
11	5.94	0.472	00:00:20	0.9	0.425	12.00	5.94	71.26	30.270
12	7.14	0.561	00:00:20	0.9	0.505	12.00	7.14	85.70	43.272
13	8.79	0.516	00:00:20	0.9	0.464	12.00	8.79	105.49	48.990
14	7.40	0.566	00:00:20	0.9	0.509	12.00	7.40	88.75	45.210
15	7.81	0.540	00:00:20	0.9	0.486	12.00	7.81	93.71	45.542
16	7.19	0.593	00:00:20	0.9	0.534	12.00	7.19	86.28	46.048
17	7.91	0.644	00:00:20	0.9	0.580	12.00	7.91	94.94	55.030
18	6.87	0.766	00:00:20	0.9	0.689	12.00	6.87	82.39	56.801
19	10.32	0.694	00:00:20	0.9	0.625	12.00	10.32	123.83	77.343
20	10.20	0.611	00:00:20	0.9	0.550	12.00	10.20	122.38	67.295
21	6.82	0.556	00:00:20	0.9	0.500	12.00	6.82	81.80	40.935
22	7.72	0.437	00:00:20	0.9	0.393	12.00	7.72	92.58	36.412
23	10.11	0.358	00:00:20	0.9	0.322	12.00	10.11	121.37	39.105
24	4.66	0.210	00:00:20	0.9	0.189	24.00	2.33	55.94	10.573
								1946.45	951.089

Calculo realizado con SOMMER RG-30	
Area hidráulica	1946.45
Velocidad media	0.489
Gasto	951.089

Tabla 21. Aforo realizado el 11 de junio 2016 utilizando sensor de velocidad superficial SOMMER RG-30



AFORO REALIZADO EL 22 DE JUNIO 2016 UTILIZANDO SENSOR DE VELOCIDAD SUPERFICIAL SOMMER RG-30

Punto de medición	Profundidad	Velocidad Superficial	Tiempo de medición	Factor k	Velocidad media	Ancho de sección	Profundidad media de la dovola	Area dovola	Gasto parcial
1	4.48	0.252	00:00:20	0.9	0.227	12.00	2.24	26.85	6.090
2	5.87	0.529	00:00:20	0.9	0.476	12.00	5.87	70.49	33.559
3	7.56	0.529	00:00:20	0.9	0.476	12.00	7.56	90.66	43.163
4	7.55	0.576	00:00:20	0.9	0.518	12.00	7.55	90.62	46.979
5	7.62	0.639	00:00:20	0.9	0.575	12.00	7.62	91.44	52.587
6	9.42	0.708	00:00:20	0.9	0.637	12.00	9.42	113.08	72.052
7	10.10	0.766	00:00:20	0.9	0.689	12.00	10.10	121.14	83.514
8	10.35	0.867	00:00:20	0.9	0.780	12.00	10.35	124.21	96.923
9	9.92	0.820	00:00:20	0.9	0.738	12.00	9.92	119.09	87.887
10	8.78	0.671	00:00:20	0.9	0.604	12.00	8.78	105.34	63.612
11	8.73	0.685	00:00:20	0.9	0.617	12.00	8.73	104.75	64.577
12	9.80	0.757	00:00:20	0.9	0.681	12.00	9.80	117.60	80.121
13	11.34	0.668	00:00:20	0.9	0.601	12.00	11.34	136.10	81.826
14	10.34	0.719	00:00:20	0.9	0.647	12.00	10.34	124.04	80.269
15	10.53	0.685	00:00:20	0.9	0.617	12.00	10.53	126.31	77.871
16	9.87	0.822	00:00:20	0.9	0.740	12.00	9.87	118.49	87.657
17	10.49	0.877	00:00:20	0.9	0.789	12.00	10.49	125.87	99.348
18	9.65	0.915	00:00:20	0.9	0.824	12.00	9.65	115.84	95.391
19	12.86	0.909	00:00:20	0.9	0.818	12.00	12.86	154.28	126.220
20	13.02	0.818	00:00:20	0.9	0.736	12.00	13.02	156.28	115.050
21	9.83	0.689	00:00:20	0.9	0.620	12.00	9.83	117.92	73.125
22	10.39	0.558	00:00:20	0.9	0.502	12.00	10.39	124.69	62.620
23	13.04	0.502	00:00:20	0.9	0.452	12.00	13.04	156.52	70.714
24	7.32	0.268	00:00:20	0.9	0.241	24.00	3.66	87.88	21.196
								2719.48	1722.351

Calculo realizado con SOMMER RG-30

Area hidráulica	2719.48
Velocidad media	0.633
Gasto	1722.351

Tabla 24. Aforo realizado el 22 de junio 2016 utilizando sensor de velocidad superficial SOMMER RG-30



MAESTRÍA EN INGENIERÍA



AFORO REALIZADO EL 01 DE JULIO 2016 UTILIZANDO SENSOR DE VELOCIDAD SUPERFICIAL SOMMER RG-30

Punto de medición	Profundidad	Velocidad Superficial	Tiempo de medición	Factor k	Velocidad media	Ancho de sección	Profundidad media de la dovola	Area dovola	Gasto parcial
1	3.32	0.224	00:00:20	0.9	0.202	12.00	1.66	19.94	4.020
2	4.19	0.447	00:00:20	0.9	0.402	12.00	4.19	50.32	20.242
3	6.23	0.484	00:00:20	0.9	0.436	12.00	6.23	74.81	32.586
4	5.96	0.562	00:00:20	0.9	0.506	12.00	5.96	71.56	36.193
5	6.20	0.569	00:00:20	0.9	0.512	12.00	6.20	74.39	38.094
6	7.91	0.669	00:00:20	0.9	0.602	12.00	7.91	94.96	57.173
7	8.76	0.705	00:00:20	0.9	0.635	12.00	8.76	105.17	66.729
8	9.04	0.824	00:00:20	0.9	0.742	12.00	9.04	108.46	80.431
9	8.44	0.742	00:00:20	0.9	0.668	12.00	8.44	101.27	67.627
10	7.36	0.620	00:00:20	0.9	0.558	12.00	7.36	88.26	49.249
11	7.26	0.564	00:00:20	0.9	0.508	12.00	7.26	87.08	44.204
12	8.70	0.631	00:00:20	0.9	0.568	12.00	8.70	104.41	59.296
13	9.92	0.639	00:00:20	0.9	0.575	12.00	9.92	118.99	68.432
14	8.86	0.688	00:00:20	0.9	0.619	12.00	8.86	106.33	65.841
15	9.33	0.649	00:00:20	0.9	0.584	12.00	9.33	111.95	65.389
16	8.47	0.703	00:00:20	0.9	0.633	12.00	8.47	101.65	64.315
17	9.24	0.753	00:00:20	0.9	0.678	12.00	9.24	110.82	75.103
18	8.00	0.847	00:00:20	0.9	0.762	12.00	8.00	95.98	73.163
19	11.25	0.904	00:00:20	0.9	0.814	12.00	11.25	134.94	109.787
20	11.52	0.746	00:00:20	0.9	0.671	12.00	11.52	138.20	92.790
21	8.33	0.589	00:00:20	0.9	0.530	12.00	8.33	99.96	52.989
22	9.03	0.540	00:00:20	0.9	0.486	12.00	9.03	108.37	52.669
23	11.43	0.434	00:00:20	0.9	0.391	12.00	11.43	137.18	53.584
24	6.09	0.236	00:00:20	0.9	0.212	24.00	3.05	73.12	15.550
								2318.11	1345.435

Calculo realizado con SOMMER RG-30

Area hidráulica	2318.11
Velocidad media	0.580
Gasto	1345.435

Tabla 27. Aforo realizado el 01 de julio 2016 utilizando sensor de velocidad superficial SOMMER RG-30

ANEXO 2 AFOROS REALIZADOS CON MOLINETE PRICE

AFORO REALIZADO EL 02 DE MAYO 2016 UTILIZANDO MOLINETE PRICE

Dovela	Profundidad (m)	Medición a 2/10				Medición a 8/10				Velocidad media en dovela (m/s)	Ancho de sección (m)
		Profundidad de la Observación (m)	Numero de revoluciones	Tiempo de medición (s)	Veloc en el punto (m/s)	Profundidad de la Observación (m)	Numero de revoluciones	Tiempo de medición (s)	Veloc en el punto (m/s)		
1	1.34	0.27	15	54	0.18	1.07	5	41	0.08	0.13	12.00
2	2.22	0.44	35	60	0.39	1.78	10	48	0.14	0.26	12.00
3	4.28	0.86	35	59	0.39	3.43	20	62	0.21	0.30	12.00
4	4.09	0.82	35	49	0.47	3.27	20	55	0.24	0.36	12.00
5	4.68	0.94	35	48	0.48	3.74	20	56	0.24	0.36	12.00
6	5.88	1.18	45	58	0.51	4.70	20	51	0.26	0.39	12.00
7	6.92	1.38	55	66	0.55	5.53	25	54	0.31	0.43	12.00
8	6.90	1.38	60	55	0.72	5.52	25	62	0.27	0.49	12.00
9	6.69	1.34	50	54	0.61	5.35	25	56	0.30	0.45	12.00
10	5.53	1.11	40	56	0.47	4.42	25	62	0.27	0.37	12.00
11	5.02	1.00	50	71	0.47	4.02	25	62	0.27	0.37	12.00
12	6.76	1.35	45	59	0.50	5.41	25	58	0.28	0.39	12.00
13	8.22	1.64	40	61	0.43	6.58	20	62	0.21	0.32	12.00
14	6.73	1.35	55	63	0.58	5.38	20	54	0.24	0.41	12.00
15	7.37	1.47	50	63	0.52	5.90	20	46	0.29	0.41	12.00
16	6.43	1.29	55	58	0.63	5.15	30	57	0.35	0.49	12.00
17	7.03	1.41	55	50	0.73	5.62	25	53	0.31	0.52	12.00
18	6.17	1.23	60	62	0.64	4.93	35	57	0.41	0.52	12.00
19	9.63	1.93	60	55	0.72	7.70	30	64	0.31	0.51	12.00
20	9.52	1.90	40	42	0.63	7.62	20	56	0.24	0.43	12.00
21	6.12	1.22	40	49	0.54	4.90	15	42	0.24	0.39	12.00
22	7.36	1.47	35	53	0.44	5.88	20	62	0.21	0.32	12.00
23	9.41	1.88	25	45	0.37	7.53	15	61	0.16	0.26	12.00
24	4.09	0.82	20	45	0.29	3.27	10	67	0.10	0.20	24.00

NIVEL (m.s.n.m.)	5.6
VELOCIDAD MEDIA DE LA SECCIÓN (m/s)	0.40
ÁREA HIDRÁULICA (metros ²)	1772.37
GASTO (m ³ /s)	705.58

Tabla 29. Aforo realizado el 02 de mayo 2016 utilizando molinete price

AFORO REALIZADO EL 09 DE MAYO 2016 UTILIZANDO MOLINETE PRICE

Dovela	Profundidad (m)	Medición a 2/10				Medición a 8/10			
		Profundidad de la Observación (m)	Numero de revoluciones	Tiempo de medición (s)	Veloc en el punto (m/s)	Profundidad de la Observación (m)	Numero de revoluciones	Tiempo de medición (s)	Veloc en el punto (m/s)
1	1.05	0.21	15	50	0.20	0.84	10	71	0.09
2	2.23	0.45	35	62	0.37	1.78	15	51	0.19
3	4.16	0.83	35	58	0.40	3.33	15	55	0.18
4	3.78	0.76	40	53	0.50	3.02	15	50	0.20
5	4.05	0.81	40	53	0.50	3.24	20	56	0.24
6	5.59	1.12	45	50	0.59	4.47	25	58	0.28
7	6.68	1.34	45	57	0.52	5.34	25	61	0.27
8	6.65	1.33	60	60	0.66	5.32	30	53	0.37
9	6.13	1.23	55	51	0.71	4.91	20	57	0.23
10	4.91	0.98	50	55	0.60	3.93	20	55	0.24
11	4.69	0.94	50	62	0.53	3.75	25	61	0.27
12	6.25	1.25	45	51	0.58	5.00	20	55	0.24
13	7.99	1.60	40	56	0.47	6.39	20	53	0.25
14	6.37	1.27	55	58	0.63	5.09	20	51	0.26
15	6.97	1.39	50	61	0.54	5.57	20	63	0.21
16	6.07	1.21	50	62	0.53	4.85	30	53	0.37
17	7.04	1.41	50	58	0.57	5.63	25	56	0.30
18	5.71	1.14	60	47	0.84	4.57	35	56	0.41
19	9.30	1.86	60	48	0.83	7.44	30	60	0.33
20	9.34	1.87	50	51	0.65	7.47	25	56	0.30
21	6.03	1.21	45	51	0.58	4.82	20	60	0.22
22	6.74	1.35	35	51	0.45	5.39	20	56	0.24
23	9.26	1.85	30	52	0.38	7.41	15	57	0.17
24	3.68	0.74	20	58	0.23	2.94	10	73	0.09

NIVEL (m.s.n.m.)	5.3
VELOCIDAD MEDIA DE LA SECCIÓN (m/s)	0.41
ÁREA HIDRÁULICA (metros ²)	1681.46
GASTO (m ³ /s)	695.96

Tabla 33. Aforo realizado el 09 de mayo 2016 utilizando molinete price

AFORO REALIZADO EL 14 DE MAYO 2016 UTILIZANDO MOLINETE PRICE

Dovela	Profundidad (m)	Medición a 2/10				Medición a 8/10			
		Profundidad de la Observación (m)	Numero de revoluciones	Tiempo de medición (s)	Veloc en el punto (m/s)	Profundidad de la Observación (m)	Numero de revoluciones	Tiempo de medición (s)	Veloc en el punto (m/s)
1	1.07	0.21	15	56	0.18	0.86	10	54	0.12
2	2.49	0.50	30	58	0.34	1.99	20	55	0.24
3	4.28	0.86	30	55	0.36	3.42	15	49	0.20
4	3.80	0.76	40	55	0.48	3.04	25	55	0.30
5	4.53	0.91	45	54	0.55	3.62	30	62	0.32
6	5.91	1.18	50	55	0.60	4.73	25	60	0.28
7	6.89	1.38	50	60	0.55	5.52	30	55	0.36
8	7.12	1.42	60	59	0.67	5.70	40	52	0.51
9	6.21	1.24	50	52	0.64	4.97	30	59	0.34
10	5.42	1.08	50	51	0.65	4.34	25	56	0.30
11	5.07	1.01	35	52	0.44	4.06	25	62	0.27
12	6.59	1.32	50	53	0.62	5.27	20	65	0.20
13	8.10	1.62	45	55	0.54	6.48	25	61	0.27
14	6.65	1.33	55	57	0.64	5.32	30	61	0.33
15	7.22	1.44	50	58	0.57	5.78	30	56	0.35
16	6.38	1.28	55	56	0.65	5.10	20	47	0.28
17	7.07	1.41	55	57	0.64	5.66	35	57	0.41
18	6.13	1.23	60	55	0.72	4.90	35	49	0.47
19	9.29	1.86	60	47	0.84	7.44	35	56	0.41
20	9.38	1.88	40	41	0.64	7.50	30	57	0.35
21	6.13	1.23	40	52	0.51	4.90	20	57	0.23
22	6.99	1.40	35	50	0.46	5.59	25	54	0.31
23	9.28	1.86	35	51	0.45	7.42	10	42	0.16
24	4.20	0.84	15	49	0.20	3.36	10	63	0.11

NIVEL (m.s.n.m.)	5.5
VELOCIDAD MEDIA DE LA SECCIÓN (m/s)	0.44
ÁREA HIDRÁULICA (metros ²)	1748.08
GASTO (m ³ /s)	773.81

Tabla 34. Aforo realizado el 14 de mayo 2016 utilizando molinete price



AFORO REALIZADO EL 20 DE MAYO 2016 UTILIZANDO MOLINETE PRICE

Dovela	Profundidad (m)	Medición a 2/10					Medición a 8/10				
		Profundidad de la Observación (m)	Numero de revoluciones	Tiempo de medición (s)	Velocidad el punto (m/s)	Profundidad de la Observación (m)	Numero de revoluciones	Tiempo de medición (s)	Velocidad el punto (m/s)		
1	0.62	0.12	15	56	0.18	0.50	5	42	0.08		
2	1.68	0.34	25	52	0.32	1.34	15	63	0.16		
3	3.82	0.76	25	59	0.28	3.06	15	54	0.18		
4	3.36	0.67	35	57	0.41	2.69	15	45	0.22		
5	4.00	0.80	35	58	0.40	3.20	20	59	0.22		
6	5.14	1.03	40	57	0.46	4.11	20	61	0.22		
7	6.07	1.21	50	58	0.57	4.85	20	50	0.26		
8	6.31	1.26	50	58	0.57	5.05	25	61	0.27		
9	5.80	1.16	50	62	0.53	4.64	15	42	0.24		
10	4.75	0.95	40	59	0.45	3.80	25	55	0.30		
11	4.68	0.94	40	61	0.43	3.74	15	47	0.21		
12	6.16	1.23	40	60	0.44	4.93	20	53	0.25		
13	7.47	1.49	40	54	0.49	5.98	25	59	0.28		
14	5.99	1.20	40	56	0.47	4.79	25	57	0.29		
15	6.95	1.39	40	57	0.46	5.56	20	56	0.24		
16	5.92	1.18	50	60	0.55	4.73	20	55	0.24		
17	6.63	1.33	50	57	0.58	5.30	25	61	0.27		
18	5.41	1.08	60	58	0.68	4.33	25	57	0.29		
19	8.88	1.78	60	60	0.66	7.11	20	48	0.28		
20	8.85	1.77	45	54	0.55	7.08	20	50	0.26		
21	5.89	1.18	35	58	0.40	4.71	25	56	0.30		
22	6.53	1.31	35	58	0.40	5.22	15	47	0.21		
23	8.98	1.80	25	53	0.31	7.19	10	51	0.13		
24	3.68	0.74	15	50	0.20	2.94	10	67	0.10		

NIVEL (m.s.n.m.)	5
VELOCIDAD MEDIA DE LA SECCIÓN (m/s)	0.36
ÁREA HIDRÁULICA (metros ²)	1598.84
GASTO (m ³ /s)	573.87

Tabla 35. Aforo realizado el 20 de mayo 2016 utilizando molinete price



AFORO REALIZADO EL 8 DE JUNIO 2016 UTILIZANDO MOLINETE PRICE

Dovela	Profundidad (m)	Medición a 2/10				Medición a 8/10			
		Profundidad de la Observación (m)	Numero de revoluciones	Tiempo de medición (s)	Veloc en el punto (m/s)	Profundidad de la Observación (m)	Numero de revoluciones	Tiempo de medición (s)	Veloc en el punto (m/s)
1	0.61	0.12	10	41	0.16	0.49	5	43	0.08
2	1.82	0.36	30	54	0.37	1.46	15	60	0.17
3	3.82	0.76	35	58	0.40	3.06	15	46	0.22
4	3.27	0.65	35	55	0.42	2.62	15	53	0.19
5	4.01	0.80	40	53	0.50	3.21	25	57	0.29
6	5.22	1.04	45	59	0.50	4.17	20	57	0.23
7	6.12	1.22	50	61	0.54	4.90	25	58	0.28
8	6.34	1.27	55	59	0.62	5.07	25	53	0.31
9	5.88	1.18	45	59	0.50	4.70	25	56	0.30
10	4.76	0.95	40	53	0.50	3.81	20	50	0.26
11	4.77	0.95	45	60	0.50	3.82	20	53	0.25
12	6.12	1.22	45	55	0.54	4.90	25	50	0.33
13	7.72	1.54	40	57	0.46	6.17	30	61	0.33
14	6.29	1.26	45	60	0.50	5.03	20	45	0.29
15	6.95	1.39	45	58	0.51	5.56	15	45	0.22
16	5.91	1.18	50	59	0.56	4.73	30	59	0.34
17	6.77	1.35	50	55	0.60	5.42	25	55	0.30
18	5.65	1.13	50	59	0.56	4.52	30	52	0.38
19	8.96	1.79	60	53	0.75	7.17	35	52	0.44
20	8.92	1.78	40	53	0.50	7.14	25	52	0.32
21	5.86	1.17	35	59	0.39	4.69	20	52	0.25
22	6.65	1.33	35	59	0.39	5.32	15	51	0.19
23	8.82	1.76	25	53	0.31	7.06	10	41	0.16
24	3.50	0.70	15	53	0.19	2.80	5	45	0.07

NIVEL (m.s.n.m.)	4.98
VELOCIDAD MEDIA DE LA SECCIÓN (m/s)	0.39
ÁREA HIDRÁULICA (metros ²)	1613.47
GASTO (m ³ /s)	624.03

Tabla 39. Aforo realizado el 8 de junio 2016 utilizando molinete price

AFORO REALIZADO EL 10 DE JUNIO 2016 UTILIZANDO MOLINETE PRICE

Dovela	Profundidad (m)	Medición a 2/10				Medición a 8/10			
		Profundidad de la Observación (m)	Numero de revoluciones	Tiempo de medición (s)	Veloc en el punto (m/s)	Profundidad de la Observación (m)	Numero de revoluciones	Tiempo de medición (s)	Veloc en el punto (m/s)
1	0.85	0.17	15	54	0.18	0.68	10	67	0.10
2	2.19	0.44	35	60	0.39	1.75	20	52	0.25
3	3.93	0.79	35	58	0.40	3.14	20	53	0.25
4	3.76	0.75	40	53	0.50	3.00	25	59	0.28
5	4.18	0.84	40	52	0.51	3.35	20	63	0.21
6	5.44	1.09	45	45	0.66	4.36	25	51	0.32
7	6.40	1.28	55	59	0.62	5.12	20	51	0.26
8	7.05	1.41	60	56	0.71	5.64	30	56	0.35
9	6.05	1.21	50	52	0.64	4.84	35	53	0.44
10	5.00	1.00	45	53	0.56	4.00	20	53	0.25
11	5.02	1.00	50	55	0.60	4.02	20	62	0.21
12	6.42	1.28	45	54	0.55	5.13	30	54	0.37
13	7.98	1.60	50	51	0.65	6.38	20	50	0.26
14	6.69	1.34	55	57	0.64	5.35	30	56	0.35
15	7.24	1.45	50	57	0.58	5.79	35	58	0.40
16	5.94	1.19	55	54	0.67	4.75	30	55	0.36
17	7.01	1.40	55	50	0.73	5.61	30	54	0.37
18	5.83	1.17	60	55	0.72	4.66	40	55	0.48
19	9.21	1.84	60	52	0.76	7.37	35	52	0.44
20	9.23	1.85	50	51	0.65	7.38	30	50	0.40
21	6.25	1.25	45	49	0.61	5.00	20	52	0.25
22	7.00	1.40	40	53	0.50	5.60	20	54	0.24
23	9.28	1.86	30	51	0.39	7.43	15	54	0.18
24	4.12	0.82	20	59	0.22	3.29	10	58	0.11

NIVEL (m.s.n.m.)	5.36
VELOCIDAD MEDIA DE LA SECCIÓN (m/s)	0.45
ÁREA HIDRÁULICA (metros ²)	1699.66
GASTO (m ³ /s)	771.96

Tabla 40. Aforo realizado el 10 de junio 2016 utilizando molinete price



AFORO REALIZADO EL 11 DE JUNIO 2016 UTILIZANDO MOLINETE PRICE

Dovela	Profundidad (m)	Medición a 2/10				Medición a 8/10			
		Profundidad de la Observación (m)	Numero de revoluciones	Tiempo de medición (s)	Velocidad en el punto (m/s)	Profundidad de la Observación (m)	Numero de revoluciones	Tiempo de medición (s)	Velocidad en el punto (m/s)
1	1.75	0.35	15	50	0.20	1.40	10	67	0.10
2	3.09	0.62	35	60	0.39	2.47	20	50	0.26
3	5.09	1.02	35	58	0.40	4.07	20	55	0.24
4	4.89	0.98	45	56	0.53	3.92	25	63	0.26
5	5.07	1.01	45	57	0.52	4.05	25	62	0.27
6	6.41	1.28	50	58	0.57	5.12	25	54	0.31
7	7.47	1.49	60	53	0.75	5.98	20	48	0.28
8	7.63	1.53	65	48	0.89	6.10	25	49	0.34
9	6.90	1.38	65	53	0.81	5.52	25	60	0.28
10	5.91	1.18	50	59	0.56	4.73	30	52	0.38
11	5.94	1.19	50	58	0.57	4.75	15	49	0.20
12	7.14	1.43	50	54	0.61	5.71	25	51	0.32
13	8.79	1.76	50	56	0.59	7.03	10	23	0.29
14	7.40	1.48	55	58	0.63	5.92	20	50	0.26
15	7.81	1.56	50	52	0.64	6.25	25	59	0.28
16	7.19	1.44	55	59	0.62	5.75	30	58	0.34
17	7.91	1.58	55	55	0.66	6.33	30	55	0.36
18	6.87	1.37	65	50	0.86	5.49	45	52	0.57
19	10.32	2.06	65	52	0.83	8.26	35	54	0.43
20	10.20	2.04	55	51	0.71	8.16	30	58	0.34
21	6.82	1.36	50	52	0.64	5.45	25	57	0.29
22	7.72	1.54	40	56	0.47	6.17	20	59	0.22
23	10.11	2.02	35	57	0.41	8.09	25	59	0.28
24	4.66	0.93	20	59	0.22	3.73	10	53	0.13

NIVEL (m.s.n.m.)	6.22
VELOCIDAD MEDIA DE LA SECCIÓN (m/s)	0.46
ÁREA HIDRÁULICA (metros ²)	1946.45
GASTO (m ³ /s)	902.23

Tabla 41. Aforo realizado el 11 de junio 2016 utilizando molinete price

AFORO REALIZADO EL 13 DE JUNIO 2016 UTILIZANDO MOLINETE PRICE

Dovela	Profundidad (m)	Medición a 2/10				Medición a 8/10			
		Profundidad de la Observación (m)	Numero de revoluciones	Tiempo de medición (s)	Veloc en el punto (m/s)	Profundidad de la Observación (m)	Numero de revoluciones	Tiempo de medición (s)	Veloc en el punto (m/s)
1	2.36	0.47	20	51	0.26	1.89	10	65	0.10
2	3.69	0.74	40	56	0.47	2.95	15	47	0.21
3	5.43	1.09	40	54	0.49	4.34	20	60	0.22
4	5.45	1.09	50	59	0.56	4.36	30	59	0.34
5	5.84	1.17	50	57	0.58	4.67	20	54	0.24
6	7.27	1.45	60	55	0.72	5.82	30	53	0.37
7	8.05	1.61	60	56	0.71	6.44	30	58	0.34
8	8.44	1.69	65	47	0.91	6.75	35	55	0.42
9	7.58	1.52	60	50	0.79	6.06	25	50	0.33
10	6.77	1.35	55	58	0.63	5.42	25	50	0.33
11	6.44	1.29	55	57	0.64	5.15	25	57	0.29
12	7.71	1.54	60	54	0.73	6.17	20	51	0.26
13	9.33	1.87	50	49	0.67	7.46	25	52	0.32
14	8.21	1.64	55	58	0.63	6.57	30	53	0.37
15	8.77	1.75	55	54	0.67	7.02	35	55	0.42
16	7.72	1.54	60	56	0.71	6.18	35	52	0.44
17	8.40	1.68	65	50	0.86	6.72	30	59	0.34
18	7.37	1.47	65	53	0.81	5.90	40	53	0.50
19	10.58	2.12	65	46	0.93	8.46	30	56	0.35
20	11.02	2.20	55	51	0.71	8.82	25	52	0.32
21	7.33	1.47	55	51	0.71	5.86	25	54	0.31
22	8.41	1.68	40	51	0.52	6.73	20	60	0.22
23	10.65	2.13	30	50	0.40	8.52	20	51	0.26
24	5.46	1.09	20	59	0.22	4.37	10	50	0.13

NIVEL (m.s.n.m.)	6.84
VELOCIDAD MEDIA DE LA SECCIÓN (m/s)	0.50
ÁREA HIDRÁULICA (metros ²)	2125.31
GASTO (m ³ /s)	1054.98

Tabla 42. Aforo realizado el 13 de junio 2016 utilizando molinete price

AFORO REALIZADO EL 15 DE JUNIO 2016 UTILIZANDO MOLINETE PRICE

Dovela	Profundidad (m)	Medición a 2/10				Medición a 8/10			
		Profundidad de la Observación (m)	Numero de revoluciones	Tiempo de medición (s)	Veloc en el punto (m/s)	Profundidad de la Observación (m)	Numero de revoluciones	Tiempo de medición (s)	Veloc en el punto (m/s)
1	2.66	0.53	20	54	0.24	2.13	10	40	0.17
2	3.70	0.74	40	57	0.46	2.96	20	50	0.26
3	5.60	1.12	45	58	0.51	4.48	20	61	0.22
4	5.60	1.12	50	59	0.56	4.48	40	58	0.46
5	5.88	1.18	50	58	0.57	4.70	40	52	0.51
6	7.25	1.45	70	49	0.94	5.80	20	49	0.27
7	8.00	1.60	70	53	0.87	6.40	20	49	0.27
8	8.55	1.71	70	48	0.96	6.84	40	52	0.51
9	7.96	1.59	70	52	0.89	6.37	35	49	0.47
10	6.73	1.35	60	60	0.66	5.38	30	50	0.40
11	6.55	1.31	65	54	0.79	5.24	20	58	0.23
12	8.08	1.62	65	57	0.75	6.46	35	44	0.53
13	9.51	1.90	70	60	0.77	7.60	25	53	0.31
14	8.22	1.64	70	53	0.87	6.58	25	55	0.30
15	8.60	1.72	70	54	0.86	6.88	30	53	0.37
16	7.76	1.55	70	49	0.94	6.21	35	54	0.43
17	8.62	1.72	70	48	0.96	6.89	35	53	0.44
18	7.65	1.53	70	41	1.13	6.12	35	48	0.48
19	10.80	2.16	60	44	0.90	8.64	35	49	0.47
20	10.76	2.15	60	43	0.92	8.61	25	57	0.29
21	7.72	1.54	60	47	0.84	6.18	20	55	0.24
22	8.56	1.71	40	49	0.54	6.85	30	50	0.40
23	10.80	2.16	30	47	0.42	8.64	25	49	0.34
24	5.42	1.08	25	56	0.30	4.34	10	58	0.11

NIVEL (m.s.n.m.)	6.91
VELOCIDAD MEDIA DE LA SECCIÓN (m/s)	0.57
ÁREA HIDRÁULICA (metros ²)	2155.60
GASTO (m ³ /s)	1228.96

Tabla 43. Aforo realizado el 15 de junio 2016 utilizando molinete price

AFORO REALIZADO EL 22 DE JUNIO 2016 UTILIZANDO MOLINETE PRICE

Dovela	Profundidad (m)	Medición a 2/10				Medición a 8/10			
		Profundidad de la Observación (m)	Numero de revoluciones	Tiempo de medición (s)	Veloc en el punto (m/s)	Profundidad de la Observación (m)	Numero de revoluciones	Tiempo de medición (s)	Veloc en el punto (m/s)
1	4.48	0.90	20	46	0.29	3.58	10	40	0.17
2	5.87	1.17	55	59	0.62	4.70	30	60	0.33
3	7.56	1.51	55	55	0.66	6.04	25	51	0.32
4	7.55	1.51	55	60	0.61	6.04	40	54	0.49
5	7.62	1.52	60	58	0.68	6.10	45	56	0.53
6	9.42	1.88	85	54	1.04	7.54	30	53	0.37
7	10.10	2.02	80	46	1.15	8.08	30	52	0.38
8	10.35	2.07	80	45	1.17	8.28	45	56	0.53
9	9.92	1.98	75	47	1.05	7.94	35	45	0.51
10	8.78	1.76	70	58	0.80	7.02	35	52	0.44
11	8.73	1.75	70	46	1.00	6.98	20	52	0.25
12	9.80	1.96	70	54	0.86	7.84	50	52	0.64
13	11.34	2.27	80	59	0.90	9.07	25	57	0.29
14	10.34	2.07	80	51	1.04	8.27	30	54	0.37
15	10.53	2.11	80	55	0.96	8.42	25	53	0.31
16	9.87	1.97	80	46	1.15	7.90	40	56	0.47
17	10.49	2.10	70	38	1.22	8.39	35	59	0.39
18	9.65	1.93	70	37	1.25	7.72	45	53	0.56
19	12.86	2.57	70	44	1.05	10.29	45	57	0.52
20	13.02	2.60	80	43	1.23	10.42	30	52	0.38
21	9.83	1.97	70	46	1.00	7.86	25	57	0.29
22	10.39	2.08	50	53	0.62	8.31	30	49	0.40
23	13.04	2.61	45	55	0.54	10.43	35	49	0.47
24	7.32	1.46	25	49	0.34	5.86	15	61	0.16

NIVEL (m.s.n.m.)	8.94
VELOCIDAD MEDIA DE LA SECCIÓN (m/s)	0.67
AREA HIDRÁULICA (metros ²)	2719.48
GASTO (m ³ /s)	1817.35

Tabla 44. Aforo realizado el 22 de junio 2016 utilizando molinete price

AFORO REALIZADO EL 25 DE JUNIO 2016 UTILIZANDO MOLINETE PRICE

Dovela	Profundidad (m)	Medición a 2/10				Medición a 8/10			
		Profundidad de la Observación (m)	Numero de revoluciones	Tiempo de medición (s)	Veloc en el punto (m/s)	Profundidad de la Observación (m)	Numero de revoluciones	Tiempo de medición (s)	Veloc en el punto (m/s)
1	3.41	0.68	20	51	0.26	2.72	10	46	0.14
2	4.46	0.89	45	59	0.50	3.57	25	54	0.31
3	6.55	1.31	50	59	0.56	5.24	30	59	0.34
4	6.44	1.29	50	46	0.72	5.15	25	50	0.33
5	6.58	1.32	60	57	0.70	5.27	25	53	0.31
6	7.97	1.59	70	53	0.87	6.38	40	58	0.46
7	9.21	1.84	65	56	0.77	7.37	40	58	0.46
8	9.18	1.84	70	50	0.92	7.34	45	55	0.54
9	8.82	1.76	65	46	0.93	7.06	35	52	0.44
10	7.59	1.52	55	51	0.71	6.07	35	57	0.41
11	7.28	1.46	55	51	0.71	5.82	30	58	0.34
12	8.72	1.74	55	51	0.71	6.98	40	53	0.50
13	10.41	2.08	50	46	0.72	8.33	30	56	0.35
14	8.84	1.77	55	50	0.73	7.07	35	57	0.41
15	9.79	1.96	70	58	0.80	7.83	30	53	0.37
16	8.64	1.73	70	45	1.03	6.92	40	59	0.45
17	9.33	1.87	70	49	0.94	7.46	40	60	0.44
18	8.53	1.71	70	53	0.87	6.82	50	51	0.65
19	11.82	2.36	70	51	0.91	9.45	40	46	0.57
20	11.80	2.36	60	44	0.90	9.44	30	52	0.38
21	8.38	1.68	50	47	0.70	6.71	30	58	0.34
22	9.51	1.90	45	48	0.62	7.60	20	55	0.24
23	11.82	2.36	40	58	0.46	9.46	20	50	0.26
24	6.62	1.32	20	51	0.26	5.30	10	41	0.16

NIVEL (m.s.n.m.)	7.85
VELOCIDAD MEDIA DE LA SECCIÓN (m/s)	0.57
ÁREA HIDRÁULICA (metros ²)	2400.09
GASTO (m ³ /s)	1377.83

Tabla 45. Aforo realizado el 25 de junio 2016 utilizando molinete price

AFORO REALIZADO EL 27 DE JUNIO 2016 UTILIZANDO MOLINETE PRICE

Dovela	Profundidad (m)	Medición a 2/10				Medición a 8/10				Veloc en el punto (m/s)
		Profundidad de la Observación (m)	Numero de revoluciones	Tiempo de medición (s)	Veloc en el punto (m/s)	Profundidad de la Observación (m)	Numero de revoluciones	Tiempo de medición (s)		
1	2.80	0.56	25	57	0.29	2.24	10	47	0.1	
2	3.84	0.77	40	52	0.51	3.07	20	49	0.3	
3	5.94	1.19	50	56	0.59	4.75	25	51	0.3	
4	5.55	1.11	50	52	0.64	4.44	30	54	0.4	
5	6.08	1.22	60	55	0.72	4.86	30	55	0.4	
6	7.34	1.47	70	60	0.77	5.87	40	53	0.5	
7	8.38	1.68	70	50	0.92	6.70	35	56	0.4	
8	8.65	1.73	70	45	1.03	6.92	40	44	0.6	
9	8.03	1.61	70	55	0.84	6.42	40	53	0.5	
10	7.07	1.41	70	60	0.77	5.66	30	55	0.4	
11	6.82	1.36	70	59	0.78	5.46	30	51	0.4	
12	8.23	1.65	70	52	0.89	6.59	30	57	0.3	
13	9.86	1.97	70	53	0.87	7.88	35	55	0.4	
14	8.41	1.68	70	53	0.87	6.73	35	48	0.5	
15	8.81	1.76	70	54	0.86	7.04	35	58	0.4	
16	7.73	1.55	70	57	0.81	6.19	35	56	0.4	
17	8.83	1.77	80	51	1.04	7.06	40	60	0.4	
18	7.79	1.56	70	42	1.10	6.23	50	52	0.6	
19	10.99	2.20	70	40	1.16	8.80	35	51	0.5	
20	11.10	2.22	60	43	0.92	8.88	35	42	0.6	
21	7.63	1.53	60	46	0.86	6.11	30	52	0.4	
22	8.86	1.77	45	50	0.59	7.09	50	87	0.4	
23	10.95	2.19	45	51	0.58	8.76	15	48	0.2	
24	5.53	1.11	20	47	0.28	4.42	10	47	0.1	

NIVEL (m.s.n.m.)	7.13
VELOCIDAD MEDIA DE LA SECCIÓN (m/s)	0.62
ÁREA HIDRÁULICA (metros ²)	2205.76
GASTO (m ³ /s)	1360.92

Tabla 46. Aforo realizado el 27 de junio 2016 utilizando molinete price

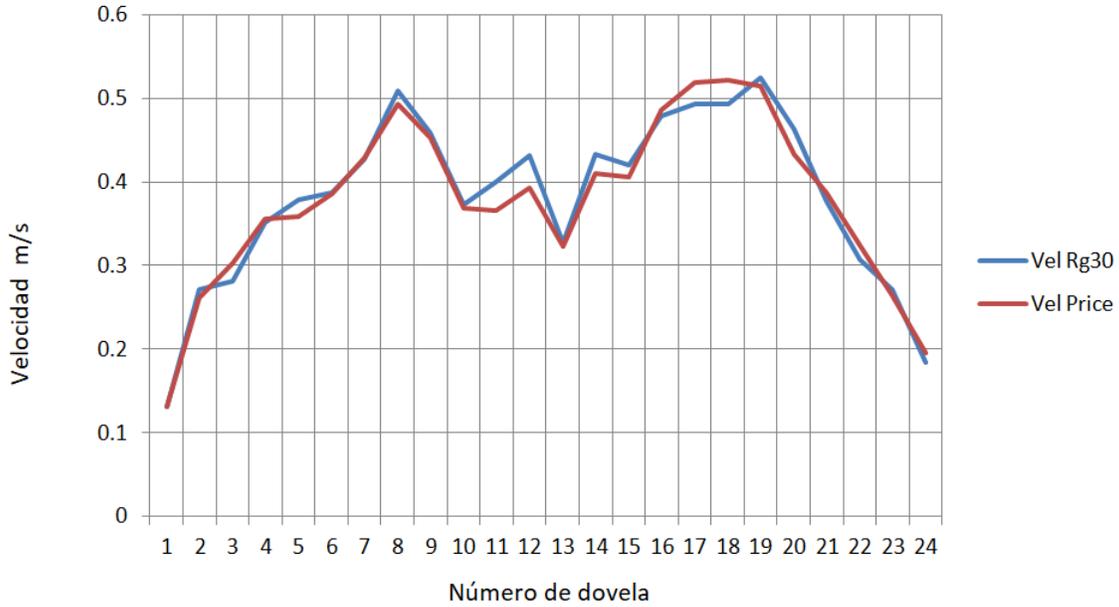
ANEXO 3 AFOROS REALIZADOS CON PERFILADOR ACÚSTICO DOPPLER.

No. de aforo	Fecha de aforo	Area (m ²)	Velocidad (m/s)	Gasto (m ³ /s)
1	02/05/2016	1749.33	0.42	728.99
2	05/05/2016	1682.99	0.39	657.58
3	07/05/2016	1713	0.38	648.6
4	08/05/2016	1856.58	0.394	732.07
5	09/05/2016	1693.23	0.4	681.87
6	14/05/2016	1662.42	0.45	741.03
7	20/05/2016	1526.89	0.38	581.97
8	22/05/2016	1790.66	0.381	682.86
9	27/05/2016	1529.2	0.353	540.16
10	04/06/2016	1537.93	0.408	627.66
11	08/06/2016	1671.55	0.38	634.8
12	10/06/2016	1728.55	0.416	719.92
13	11/06/2016	1983.43	0.484	960.2
14	13/06/2016	2012.63	0.491	987.29
15	15/06/2016	2108.18	0.571	1203.28
16	22/06/2016	2757.55	0.653	1801.48
17	25/06/2016	2344.89	0.605	1417.7
18	27/06/2016	2293.99	0.602	1380.02
19	01/07/2016	2055.46	0.597	1227.11
20	04/07/2016	2855.99	0.696	1986.7

Tabla 49. Relación de aforos realizados con perfilador acústico doppler.

ANEXO 4 RELACIÓN DE VELOCIDADES MEDIDAS CON MOLINETE PRICE Y SENSOR DE VELOCIDAD SUPERFICIAL SOMMER RG-30.

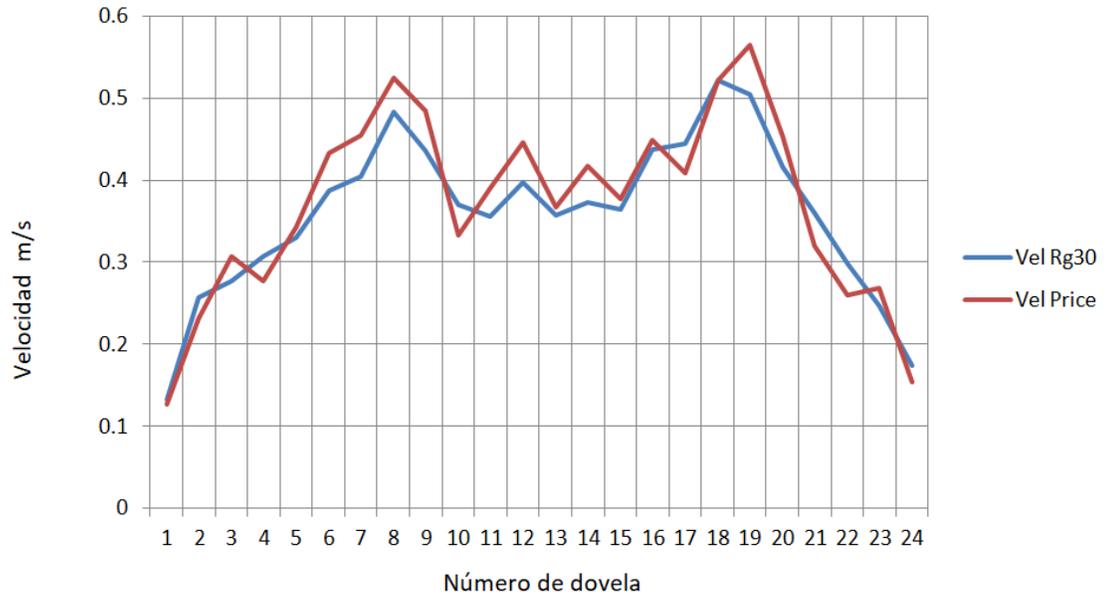
Velocidades registradas en (m/s)



Gráfica 4. Relación de velocidades del aforo 1

Aforo	Dovela	Vel RG30	V Price	Dif	Dif %
1	1	0.13	0.13	0.00	0
1	2	0.27	0.26	-0.01	-4
1	3	0.28	0.30	0.02	7
1	4	0.35	0.36	0.00	1
1	5	0.38	0.36	-0.02	-6
1	6	0.39	0.39	0.00	0
1	7	0.43	0.43	0.00	0
1	8	0.51	0.49	-0.02	-3
1	9	0.46	0.45	-0.01	-1
1	10	0.37	0.37	0.00	-1
1	11	0.40	0.37	-0.03	-9
1	12	0.43	0.39	-0.04	-10
1	13	0.33	0.32	0.00	-1
1	14	0.43	0.41	-0.02	-6
1	15	0.42	0.41	-0.01	-3
1	16	0.48	0.49	0.01	2
1	17	0.49	0.52	0.03	5
1	18	0.49	0.52	0.03	6
1	19	0.52	0.51	-0.01	-2
1	20	0.46	0.43	-0.03	-7
1	21	0.38	0.39	0.01	3
1	22	0.31	0.32	0.02	5
1	23	0.27	0.26	-0.01	-3
1	24	0.18	0.20	0.01	6

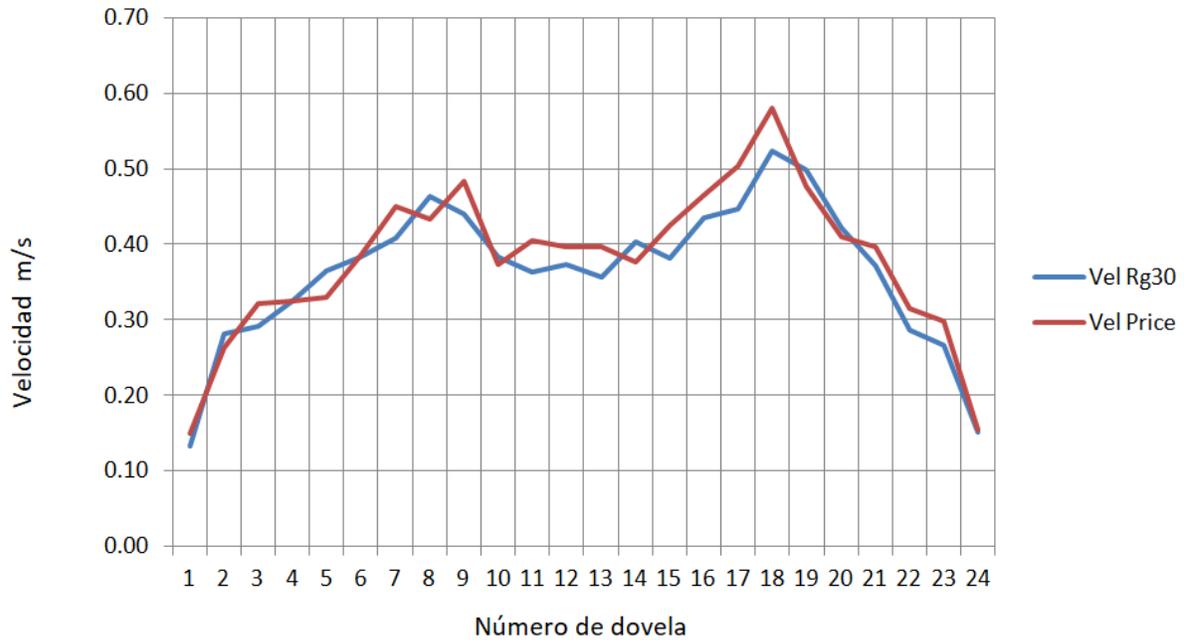
Tabla 50. Relación de velocidades del aforo 1



Gráfica 5. Relación de velocidades del aforo 2

Aforo	Dovela	Vel RG30	V Price	Dif	Dif %
2	1	0.13	0.13	-0.01	-4
2	2	0.26	0.23	-0.03	-11
2	3	0.28	0.31	0.03	10
2	4	0.31	0.28	-0.03	-11
2	5	0.33	0.34	0.01	4
2	6	0.39	0.43	0.05	11
2	7	0.40	0.45	0.05	11
2	8	0.48	0.52	0.04	8
2	9	0.44	0.48	0.05	10
2	10	0.37	0.33	-0.04	-11
2	11	0.36	0.39	0.03	9
2	12	0.40	0.45	0.05	11
2	13	0.36	0.37	0.01	3
2	14	0.37	0.42	0.04	11
2	15	0.36	0.38	0.01	3
2	16	0.44	0.45	0.01	2
2	17	0.44	0.41	-0.04	-9
2	18	0.52	0.52	0.00	0
2	19	0.50	0.56	0.06	11
2	20	0.42	0.45	0.04	8
2	21	0.36	0.32	-0.04	-13
2	22	0.30	0.26	-0.04	-15
2	23	0.25	0.27	0.02	8
2	24	0.17	0.15	-0.02	-13

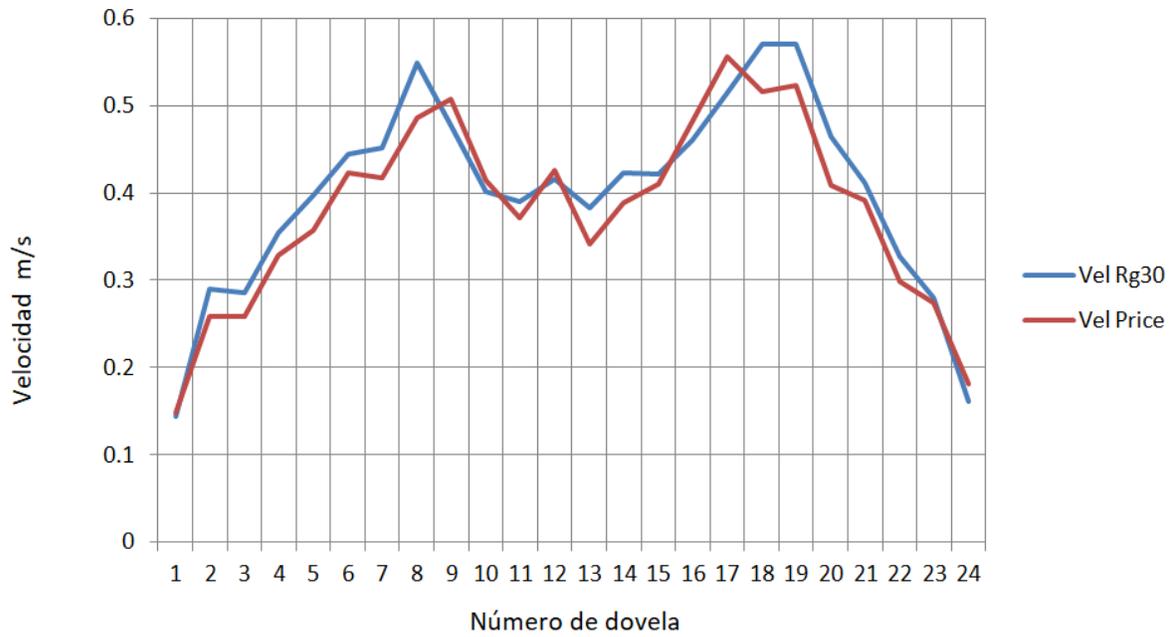
Tabla 51. Relación de velocidades del aforo 2



Gráfica 6. Relación de velocidades del aforo 3

Aforo	Dovela	Vel RG30	V Price	Dif	Dif %
3	1	0.13	0.15	0.02	11
3	2	0.28	0.26	-0.02	-7
3	3	0.29	0.32	0.03	9
3	4	0.32	0.32	0.00	0
3	5	0.37	0.33	-0.03	-11
3	6	0.38	0.38	0.00	1
3	7	0.41	0.45	0.04	9
3	8	0.46	0.43	-0.03	-7
3	9	0.44	0.48	0.04	9
3	10	0.38	0.37	-0.01	-3
3	11	0.36	0.41	0.04	10
3	12	0.37	0.40	0.02	6
3	13	0.36	0.40	0.04	10
3	14	0.40	0.38	-0.03	-7
3	15	0.38	0.43	0.04	10
3	16	0.43	0.47	0.03	7
3	17	0.45	0.50	0.06	11
3	18	0.52	0.58	0.06	10
3	19	0.50	0.48	-0.02	-4
3	20	0.42	0.41	-0.01	-3
3	21	0.37	0.40	0.03	6
3	22	0.29	0.32	0.03	9
3	23	0.27	0.30	0.03	10
3	24	0.15	0.15	0.00	2

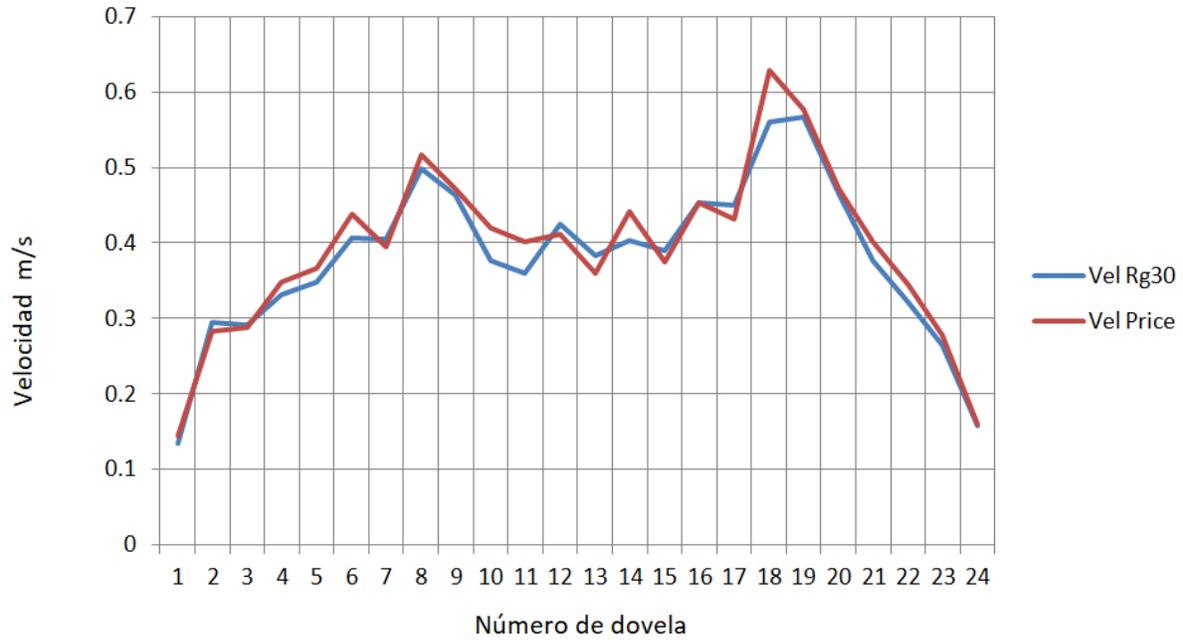
Tabla 52. Relación de velocidades del aforo 3



Gráfica 7. Relación de velocidades del aforo 4.

Aforo	Dovela	Vel RG30	V Price	Dif	Dif %
4	1	0.14	0.15	0.00	3
4	2	0.29	0.26	-0.03	-12
4	3	0.29	0.26	-0.03	-11
4	4	0.35	0.33	-0.03	-8
4	5	0.40	0.36	-0.04	-11
4	6	0.44	0.42	-0.02	-5
4	7	0.45	0.42	-0.03	-8
4	8	0.55	0.49	-0.06	-13
4	9	0.48	0.51	0.03	6
4	10	0.40	0.42	0.01	3
4	11	0.39	0.37	-0.02	-5
4	12	0.42	0.43	0.01	2
4	13	0.38	0.34	-0.04	-12
4	14	0.42	0.39	-0.03	-9
4	15	0.42	0.41	-0.01	-3
4	16	0.46	0.48	0.02	4
4	17	0.51	0.56	0.04	7
4	18	0.57	0.52	-0.05	-11
4	19	0.57	0.52	-0.05	-9
4	20	0.46	0.41	-0.06	-14
4	21	0.41	0.39	-0.02	-5
4	22	0.33	0.30	-0.03	-10
4	23	0.28	0.27	-0.01	-2
4	24	0.16	0.18	0.02	11

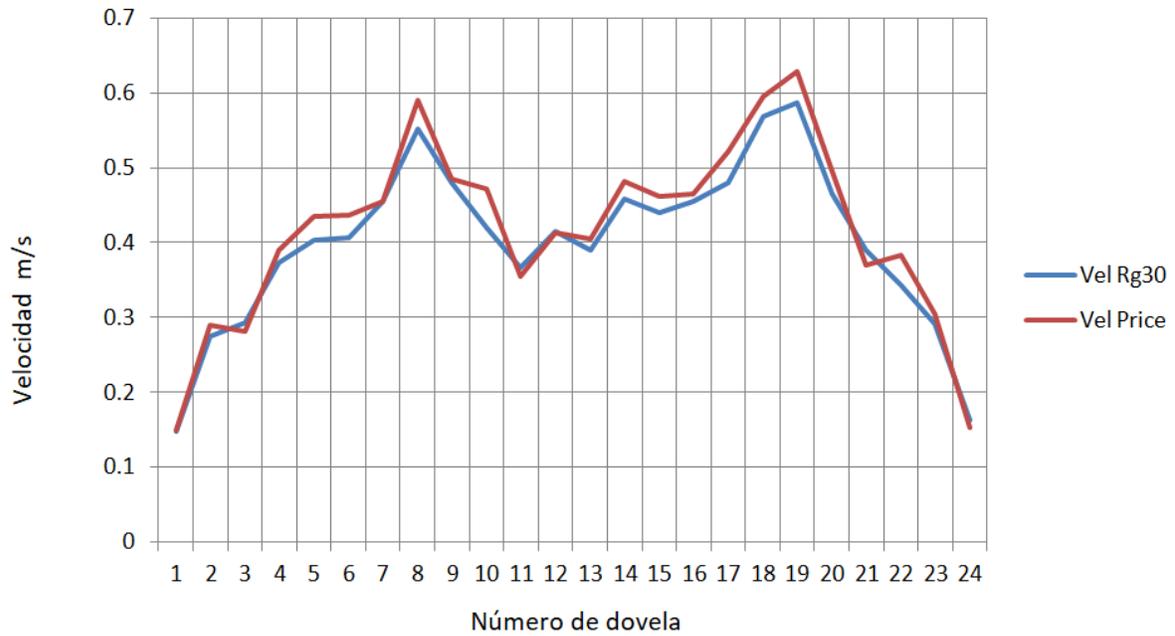
Tabla 53. Relación de velocidades del aforo 4



Gráfica 8. Relación de velocidades del aforo 5

Aforo	Dovela	Vel RG30	V Price	Dif	Dif %
5	1	0.14	0.15	0.01	7
5	2	0.30	0.28	-0.01	-4
5	3	0.29	0.29	0.00	-1
5	4	0.33	0.35	0.02	5
5	5	0.35	0.37	0.02	5
5	6	0.41	0.44	0.03	8
5	7	0.41	0.40	-0.01	-2
5	8	0.50	0.52	0.02	4
5	9	0.46	0.47	0.01	2
5	10	0.38	0.42	0.04	10
5	11	0.36	0.40	0.04	10
5	12	0.43	0.41	-0.01	-4
5	13	0.38	0.36	-0.02	-6
5	14	0.40	0.44	0.04	9
5	15	0.39	0.38	-0.02	-4
5	16	0.45	0.45	0.00	0
5	17	0.45	0.43	-0.02	-4
5	18	0.56	0.63	0.07	11
5	19	0.57	0.58	0.01	2
5	20	0.47	0.47	0.01	1
5	21	0.38	0.40	0.02	6
5	22	0.32	0.34	0.02	6
5	23	0.27	0.28	0.01	4
5	24	0.16	0.16	0.00	0

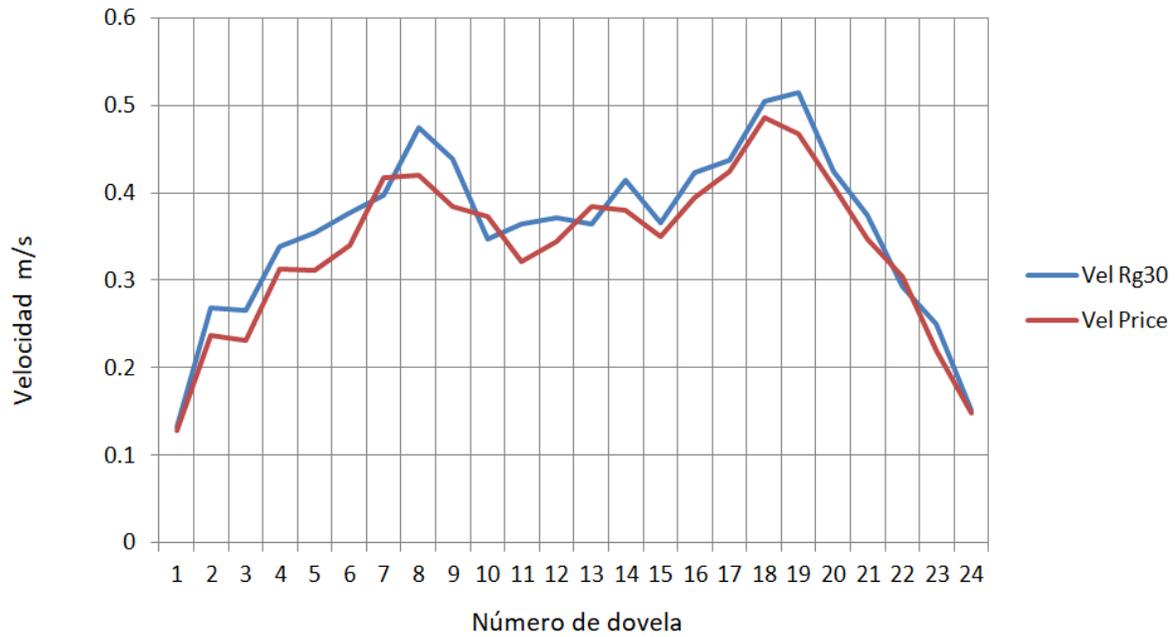
Tabla 54. Relación de velocidades del aforo 5



Gráfica 9. Relación de velocidades del aforo 6

Aforo	Dovela	Vel RG30	V Price	Dif	Dif %
6	1	0.15	0.15	0.00	1
6	2	0.28	0.29	0.02	5
6	3	0.29	0.28	-0.01	-4
6	4	0.37	0.39	0.02	4
6	5	0.40	0.43	0.03	7
6	6	0.41	0.44	0.03	7
6	7	0.46	0.46	0.00	0
6	8	0.55	0.59	0.04	6
6	9	0.48	0.49	0.01	1
6	10	0.42	0.47	0.05	11
6	11	0.37	0.36	-0.01	-3
6	12	0.42	0.41	0.00	-1
6	13	0.39	0.41	0.01	4
6	14	0.46	0.48	0.02	5
6	15	0.44	0.46	0.02	5
6	16	0.46	0.46	0.01	2
6	17	0.48	0.52	0.04	8
6	18	0.57	0.60	0.03	4
6	19	0.59	0.63	0.04	6
6	20	0.47	0.50	0.03	6
6	21	0.39	0.37	-0.02	-5
6	22	0.34	0.38	0.04	11
6	23	0.29	0.31	0.01	4
6	24	0.16	0.15	-0.01	-7

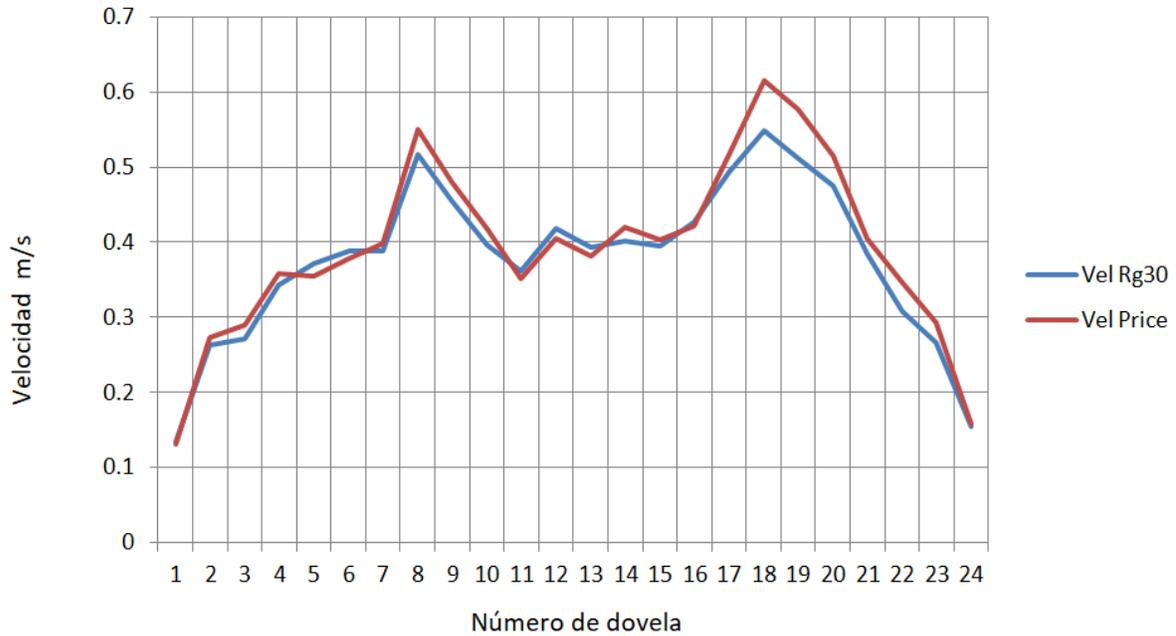
Tabla 55. Relación de velocidades del aforo 6



Gráfica 10. Relación de velocidades del aforo 7

Aforo	Dovela	Vel RG30	V Price	Dif	Dif %
7	1	0.13	0.13	-0.01	-4
7	2	0.27	0.24	-0.03	-14
7	3	0.27	0.23	-0.03	-15
7	4	0.34	0.31	-0.03	-8
7	5	0.35	0.31	-0.04	-14
7	6	0.38	0.34	-0.04	-11
7	7	0.40	0.42	0.02	5
7	8	0.47	0.42	-0.05	-13
7	9	0.44	0.38	-0.05	-14
7	10	0.35	0.37	0.03	7
7	11	0.36	0.32	-0.04	-13
7	12	0.37	0.34	-0.03	-8
7	13	0.36	0.38	0.02	5
7	14	0.41	0.38	-0.03	-9
7	15	0.37	0.35	-0.02	-5
7	16	0.42	0.40	-0.03	-7
7	17	0.44	0.42	-0.01	-3
7	18	0.50	0.49	-0.02	-4
7	19	0.51	0.47	-0.05	-10
7	20	0.42	0.41	-0.02	-4
7	21	0.37	0.35	-0.03	-8
7	22	0.29	0.30	0.01	4
7	23	0.25	0.22	-0.03	-14
7	24	0.15	0.15	0.00	-2

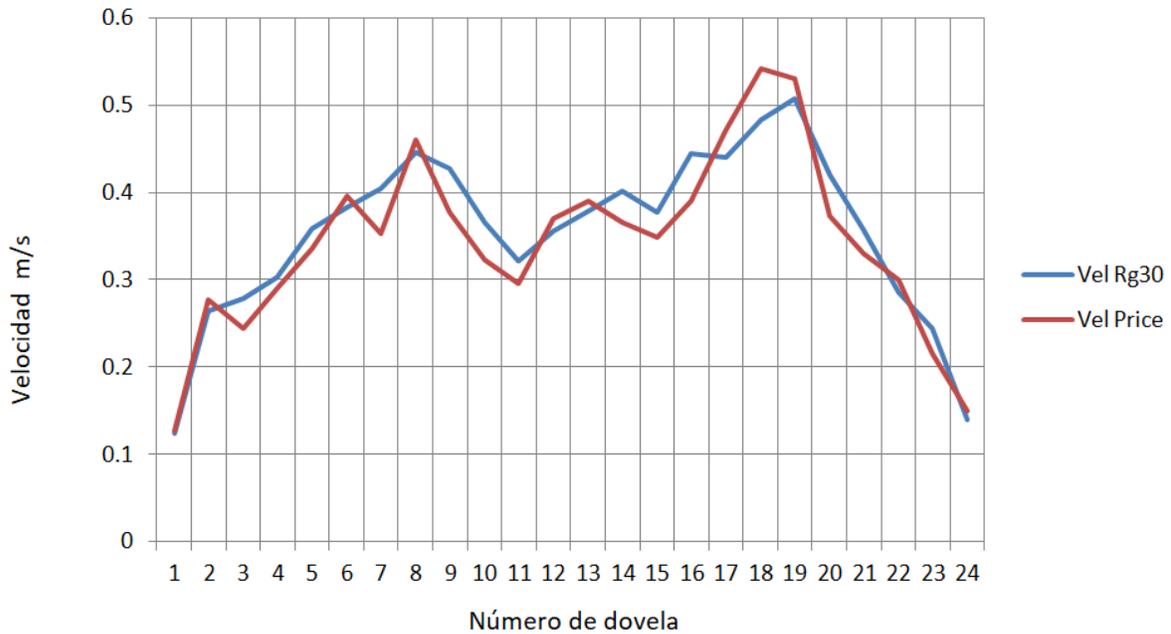
Tabla 56. Relación de velocidades del aforo 7



Gráfica 11. Relación de velocidades del aforo 8

Aforo	Dovela	Vel RG30	V Price	Dif	Dif %
8	1	0.14	0.13	0.00	-3
8	2	0.26	0.27	0.01	4
8	3	0.27	0.29	0.02	6
8	4	0.34	0.36	0.01	4
8	5	0.37	0.36	-0.02	-4
8	6	0.39	0.38	-0.01	-2
8	7	0.39	0.40	0.01	2
8	8	0.52	0.55	0.03	6
8	9	0.45	0.48	0.03	5
8	10	0.40	0.42	0.02	5
8	11	0.36	0.35	-0.01	-3
8	12	0.42	0.40	-0.01	-3
8	13	0.39	0.38	-0.01	-3
8	14	0.40	0.42	0.02	4
8	15	0.40	0.40	0.01	2
8	16	0.43	0.42	-0.01	-1
8	17	0.49	0.52	0.02	4
8	18	0.55	0.62	0.07	11
8	19	0.51	0.58	0.06	11
8	20	0.47	0.52	0.04	8
8	21	0.38	0.41	0.02	5
8	22	0.31	0.35	0.04	11
8	23	0.27	0.29	0.03	9
8	24	0.15	0.16	0.00	3

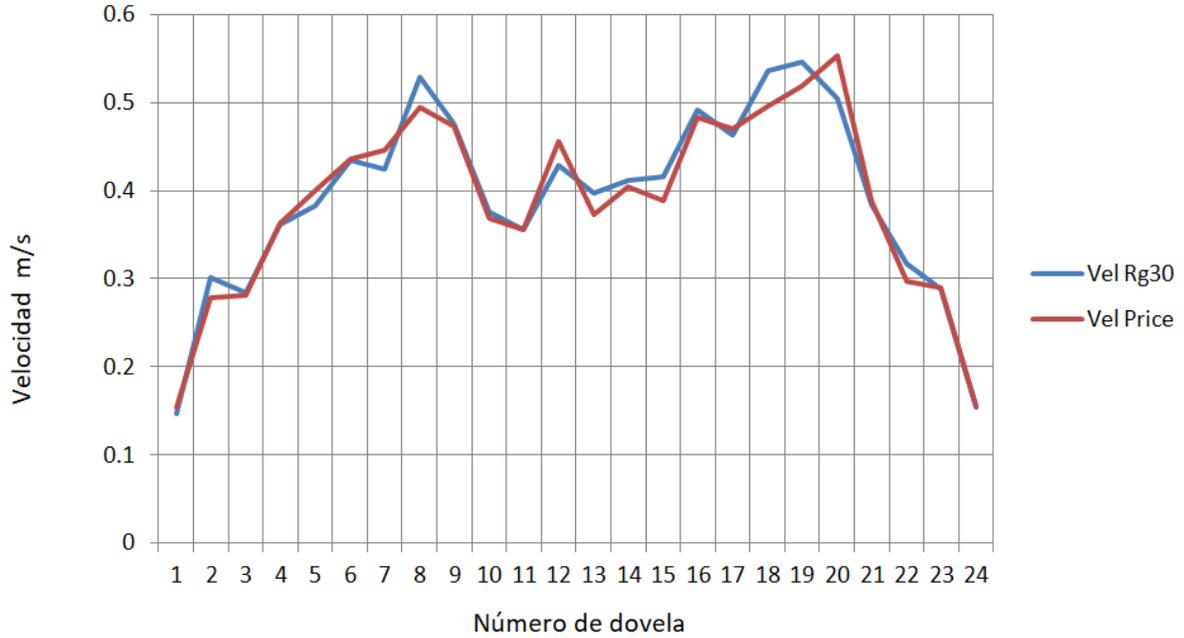
Tabla 57. Relación de velocidades del aforo 8



Gráfica 12. Relación de velocidades del aforo 9

Aforo	Dovela	Vel RG30	V Price	Dif	Dif %
9	1	0.12	0.13	0.00	3
9	2	0.26	0.28	0.01	5
9	3	0.28	0.24	-0.03	-14
9	4	0.30	0.29	-0.01	-5
9	5	0.36	0.34	-0.02	-7
9	6	0.38	0.40	0.01	3
9	7	0.40	0.35	-0.05	-14
9	8	0.45	0.46	0.01	3
9	9	0.43	0.38	-0.05	-13
9	10	0.37	0.32	-0.04	-13
9	11	0.32	0.30	-0.03	-9
9	12	0.36	0.37	0.01	4
9	13	0.38	0.39	0.01	3
9	14	0.40	0.37	-0.04	-10
9	15	0.38	0.35	-0.03	-8
9	16	0.44	0.39	-0.05	-14
9	17	0.44	0.47	0.03	7
9	18	0.48	0.54	0.06	11
9	19	0.51	0.53	0.02	4
9	20	0.42	0.37	-0.05	-13
9	21	0.36	0.33	-0.03	-8
9	22	0.29	0.30	0.02	5
9	23	0.24	0.22	-0.03	-14
9	24	0.14	0.15	0.01	6

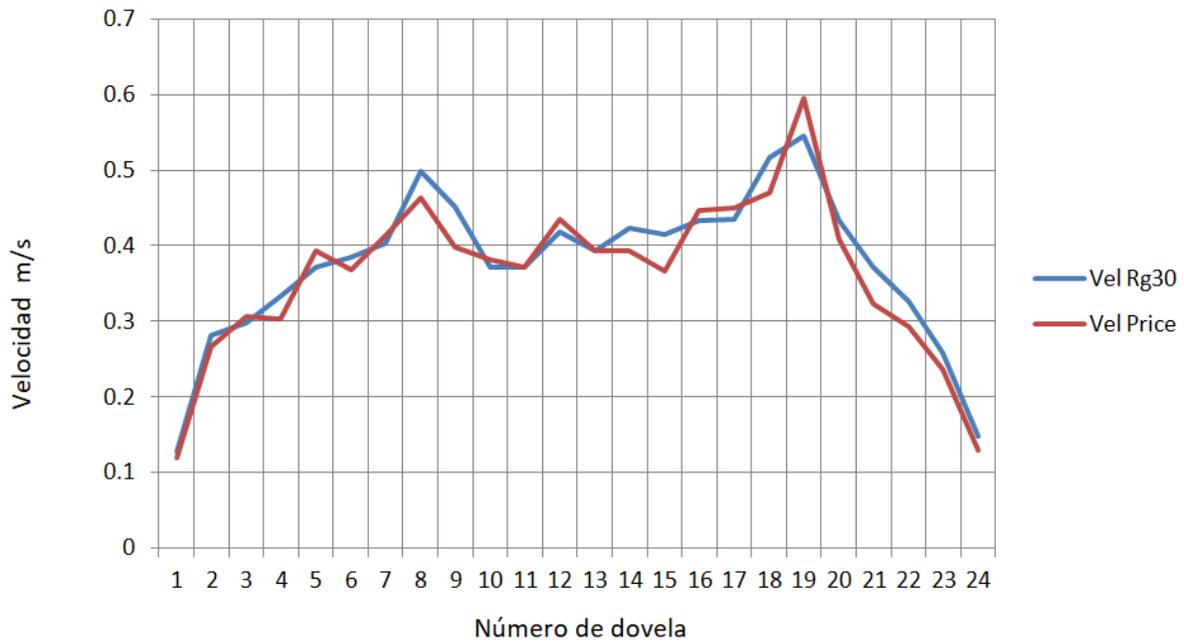
Tabla 58. Relación de velocidades del aforo 9



Gráfica 13. Relación de velocidades del aforo 10

Aforo	Dovela	Vel RG30	V Price	Dif	Dif %
10	1	0.15	0.15	0.01	4
10	2	0.30	0.28	-0.02	-8
10	3	0.28	0.28	0.00	-1
10	4	0.36	0.36	0.00	0
10	5	0.38	0.40	0.02	4
10	6	0.43	0.44	0.00	0
10	7	0.42	0.45	0.02	5
10	8	0.53	0.50	-0.03	-7
10	9	0.48	0.47	0.00	0
10	10	0.38	0.37	-0.01	-2
10	11	0.36	0.36	0.00	0
10	12	0.43	0.46	0.03	6
10	13	0.40	0.37	-0.02	-7
10	14	0.41	0.40	-0.01	-2
10	15	0.42	0.39	-0.03	-7
10	16	0.49	0.48	-0.01	-2
10	17	0.46	0.47	0.01	2
10	18	0.54	0.50	-0.04	-8
10	19	0.55	0.52	-0.03	-5
10	20	0.50	0.55	0.05	9
10	21	0.38	0.39	0.00	1
10	22	0.32	0.30	-0.02	-7
10	23	0.29	0.29	0.00	0
10	24	0.15	0.16	0.00	1

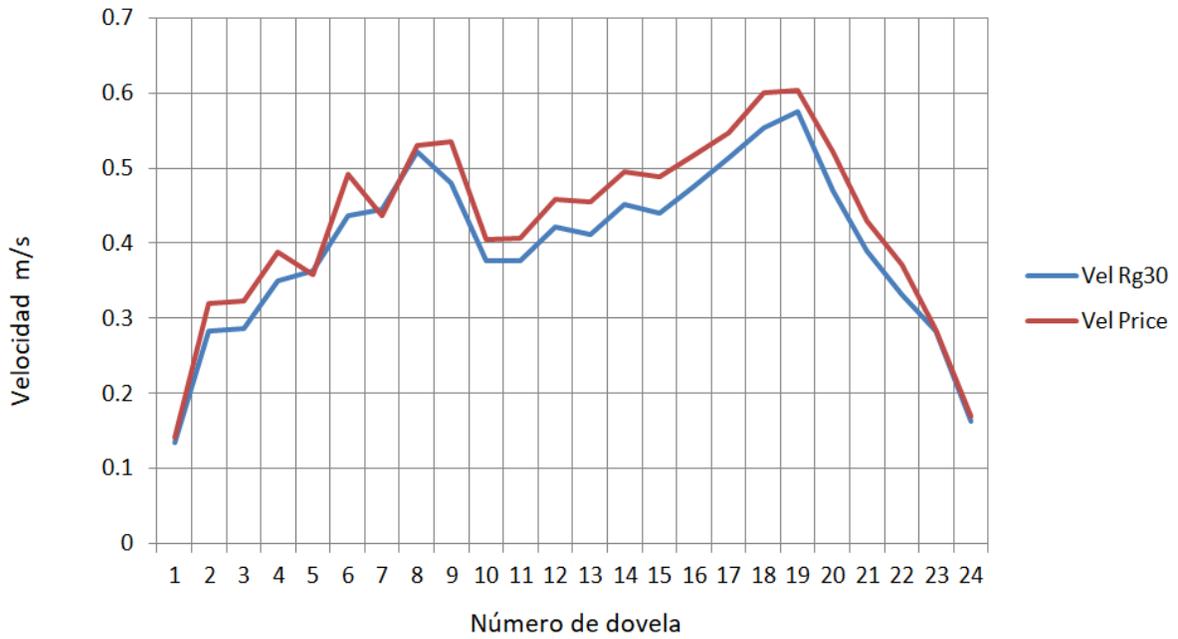
Tabla 59. Relación de velocidades del aforo 10



Gráfica 14. Relación de velocidades del aforo 11

Aforo	Dovela	Vel RG30	V Price	Dif	Dif %
11	1	0.13	0.12	-0.01	-7
11	2	0.28	0.27	-0.02	-6
11	3	0.30	0.31	0.01	3
11	4	0.33	0.30	-0.03	-10
11	5	0.37	0.39	0.02	6
11	6	0.39	0.37	-0.02	-5
11	7	0.40	0.41	0.01	2
11	8	0.50	0.46	-0.03	-7
11	9	0.45	0.40	-0.05	-13
11	10	0.37	0.38	0.01	2
11	11	0.37	0.37	0.00	0
11	12	0.42	0.44	0.02	4
11	13	0.39	0.39	0.00	0
11	14	0.42	0.39	-0.03	-7
11	15	0.42	0.37	-0.05	-14
11	16	0.43	0.45	0.01	3
11	17	0.44	0.45	0.01	3
11	18	0.52	0.47	-0.05	-10
11	19	0.54	0.60	0.05	9
11	20	0.43	0.41	-0.03	-6
11	21	0.37	0.32	-0.05	-15
11	22	0.33	0.29	-0.03	-11
11	23	0.26	0.24	-0.02	-9
11	24	0.15	0.13	-0.02	-14

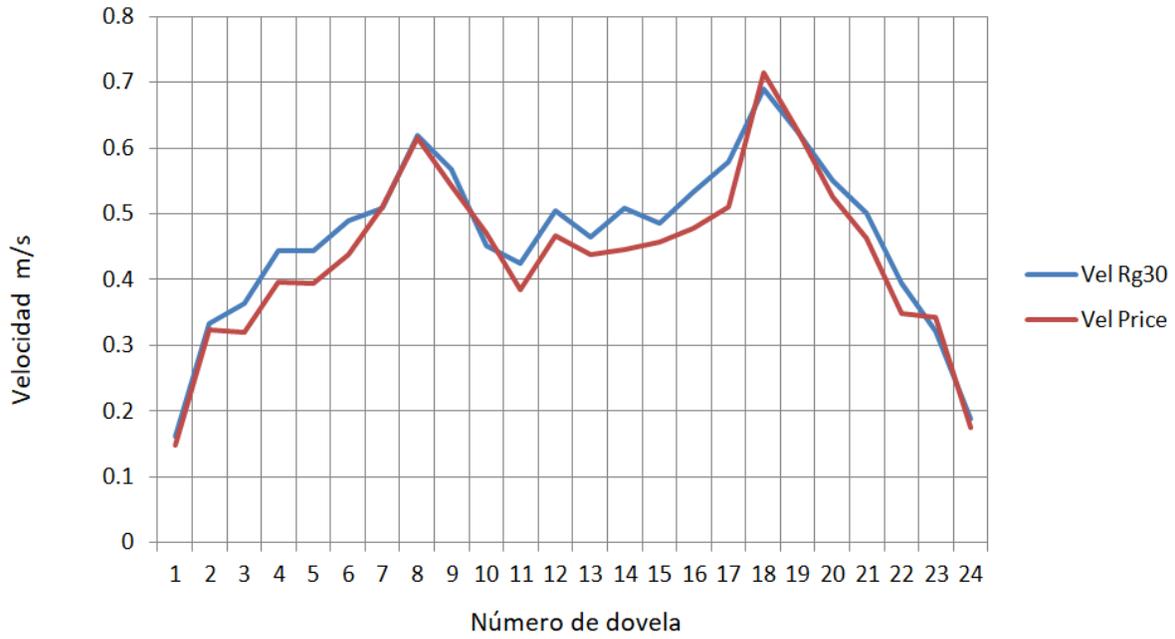
Tabla 60. Relación de velocidades del aforo 11



Gráfica 15. Relación de velocidades del aforo 12

Aforo	Dovela	Vel RG30	V Price	Dif	Dif %
12	1	0.13	0.14	0.01	5
12	2	0.28	0.32	0.04	11
12	3	0.29	0.32	0.04	11
12	4	0.35	0.39	0.04	10
12	5	0.36	0.36	0.00	-1
12	6	0.44	0.49	0.05	11
12	7	0.45	0.44	-0.01	-2
12	8	0.52	0.53	0.01	2
12	9	0.48	0.54	0.05	10
12	10	0.38	0.40	0.03	7
12	11	0.38	0.41	0.03	7
12	12	0.42	0.46	0.04	8
12	13	0.41	0.46	0.04	10
12	14	0.45	0.50	0.04	9
12	15	0.44	0.49	0.05	10
12	16	0.48	0.52	0.04	8
12	17	0.51	0.55	0.03	6
12	18	0.55	0.60	0.05	8
12	19	0.58	0.60	0.03	5
12	20	0.47	0.52	0.05	10
12	21	0.39	0.43	0.04	9
12	22	0.33	0.37	0.04	11
12	23	0.28	0.29	0.00	1
12	24	0.16	0.17	0.01	4

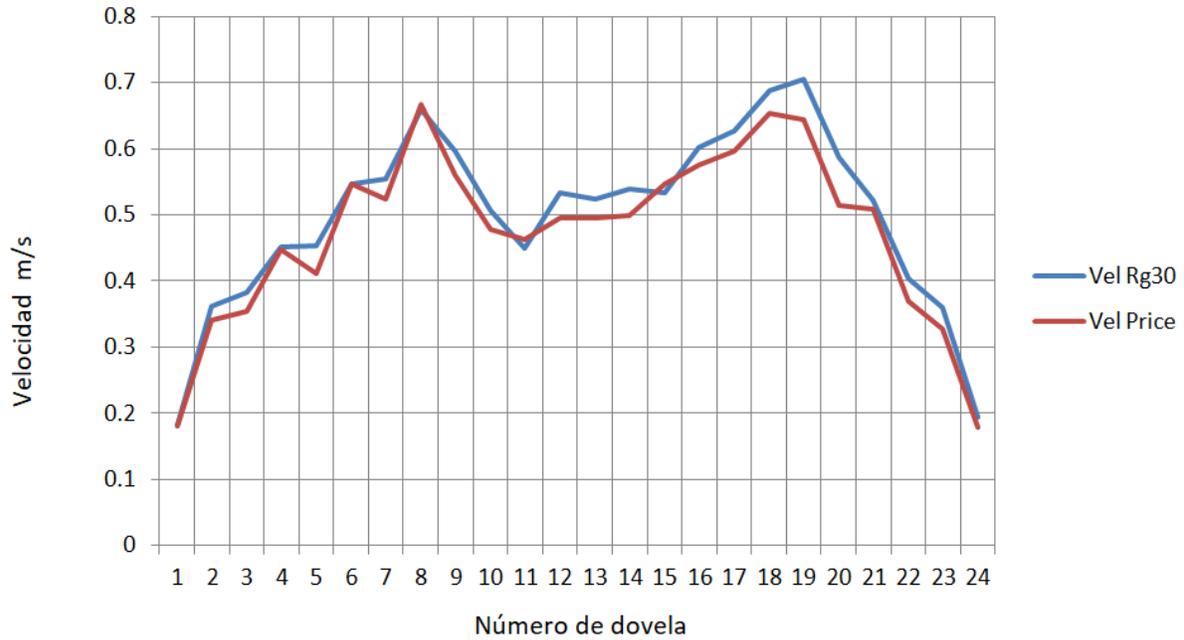
Tabla 61. Relación de velocidades del aforo 12



Gráfica 16. Relación de velocidades del aforo 13

Aforo	Dovela	Vel RG30	V Price	Dif	Dif %
13	1	0.16	0.15	-0.01	-8
13	2	0.33	0.32	-0.01	-3
13	3	0.36	0.32	-0.05	-14
13	4	0.44	0.40	-0.05	-12
13	5	0.44	0.39	-0.05	-13
13	6	0.49	0.44	-0.05	-12
13	7	0.51	0.51	0.00	0
13	8	0.62	0.62	0.00	0
13	9	0.57	0.54	-0.03	-5
13	10	0.45	0.47	0.02	4
13	11	0.42	0.39	-0.04	-10
13	12	0.50	0.47	-0.04	-8
13	13	0.46	0.44	-0.03	-6
13	14	0.51	0.45	-0.06	-14
13	15	0.49	0.46	-0.03	-6
13	16	0.53	0.48	-0.06	-12
13	17	0.58	0.51	-0.07	-14
13	18	0.69	0.71	0.03	4
13	19	0.62	0.63	0.00	0
13	20	0.55	0.53	-0.02	-4
13	21	0.50	0.46	-0.04	-8
13	22	0.39	0.35	-0.05	-13
13	23	0.32	0.34	0.02	6
13	24	0.19	0.17	-0.01	-8

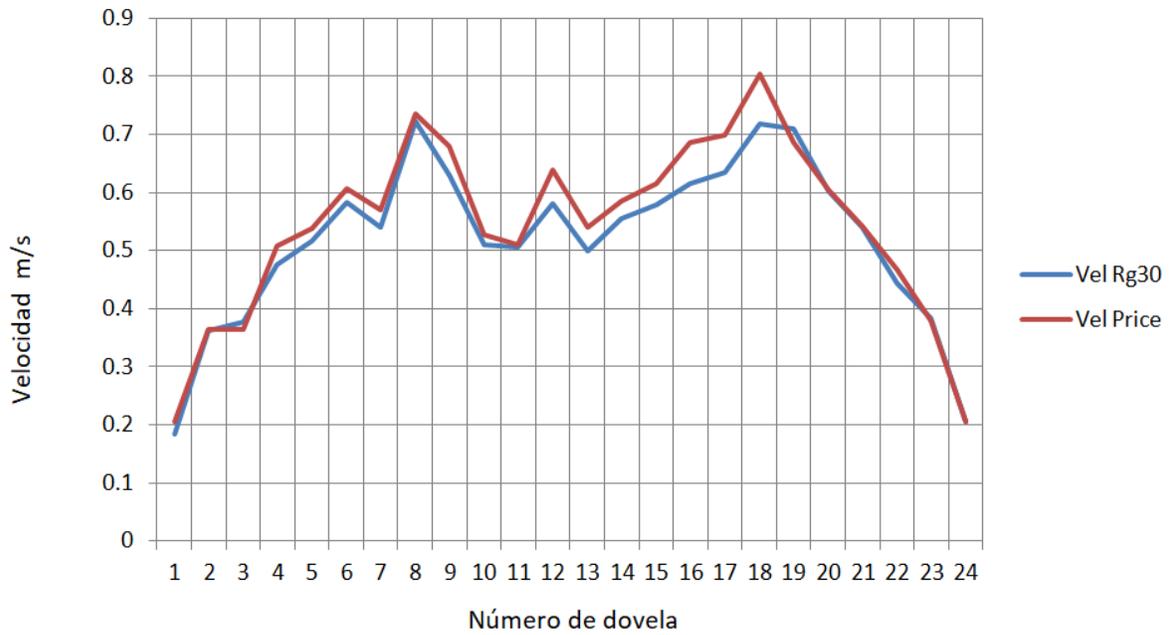
Tabla 62. Relación de velocidades del aforo 13



Gráfica 17. Relación de velocidades del aforo 14

Aforo	Dovela	Vel RG30	V Price	Dif	Dif %
14	1	0.18	0.18	0.00	-1
14	2	0.36	0.34	-0.02	-6
14	3	0.38	0.35	-0.03	-8
14	4	0.45	0.45	0.00	-1
14	5	0.45	0.41	-0.04	-10
14	6	0.55	0.55	0.00	0
14	7	0.55	0.52	-0.03	-6
14	8	0.66	0.67	0.01	1
14	9	0.60	0.56	-0.04	-6
14	10	0.51	0.48	-0.03	-6
14	11	0.45	0.46	0.01	3
14	12	0.53	0.50	-0.04	-7
14	13	0.52	0.50	-0.03	-6
14	14	0.54	0.50	-0.04	-8
14	15	0.53	0.55	0.01	2
14	16	0.60	0.58	-0.03	-4
14	17	0.63	0.60	-0.03	-5
14	18	0.69	0.65	-0.04	-5
14	19	0.70	0.64	-0.06	-10
14	20	0.59	0.51	-0.07	-14
14	21	0.52	0.51	-0.01	-3
14	22	0.40	0.37	-0.04	-10
14	23	0.36	0.33	-0.03	-10
14	24	0.19	0.18	-0.02	-9

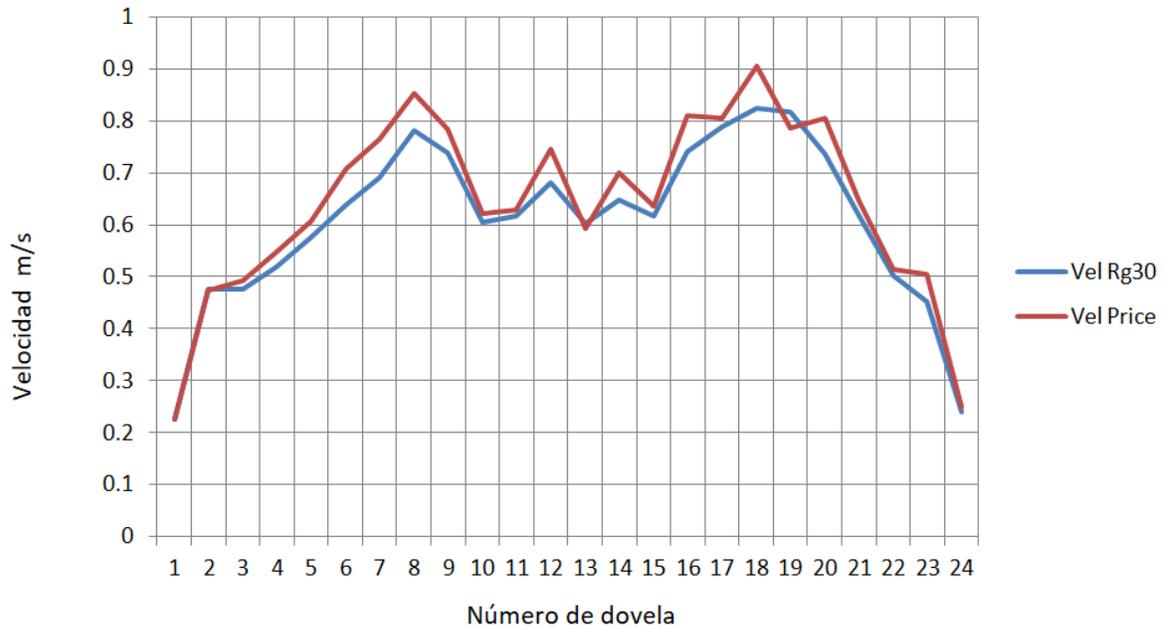
Tabla 63. Relación de velocidades del aforo 14



Gráfica 18. Relación de velocidades del aforo 15

Aforo	Dovela	Vel RG30	V Price	Dif	Dif %
15	1	0.18	0.20	0.02	10
15	2	0.36	0.36	0.00	1
15	3	0.38	0.36	-0.01	-4
15	4	0.48	0.51	0.03	6
15	5	0.52	0.54	0.02	4
15	6	0.58	0.61	0.02	4
15	7	0.54	0.57	0.03	5
15	8	0.72	0.74	0.01	2
15	9	0.63	0.68	0.05	7
15	10	0.51	0.53	0.02	3
15	11	0.51	0.51	0.01	1
15	12	0.58	0.64	0.06	9
15	13	0.50	0.54	0.04	8
15	14	0.55	0.59	0.03	5
15	15	0.58	0.62	0.04	6
15	16	0.62	0.69	0.07	10
15	17	0.64	0.70	0.06	9
15	18	0.72	0.80	0.08	11
15	19	0.71	0.69	-0.02	-3
15	20	0.60	0.61	0.00	1
15	21	0.54	0.54	0.00	0
15	22	0.44	0.47	0.02	5
15	23	0.38	0.38	0.00	-1
15	24	0.20	0.20	0.00	0

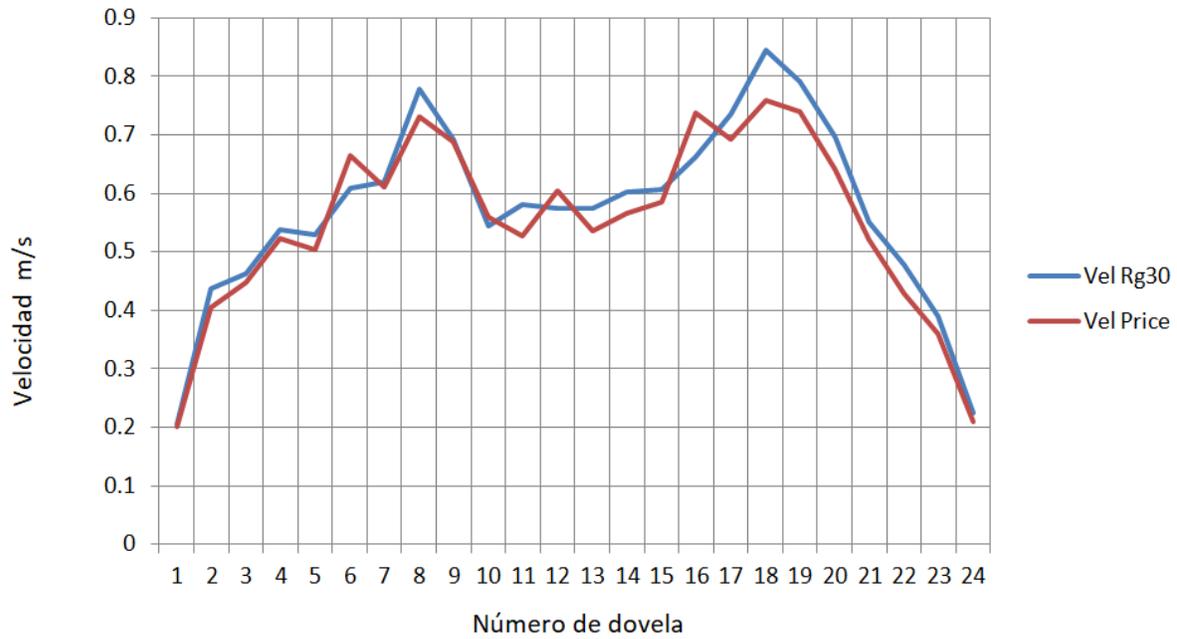
Tabla 64. Relación de velocidades del aforo 15



Gráfica 19. Relación de velocidades del aforo 16

Aforo	Dovela	Vel RG30	V Price	Dif	Dif %
16	1	0.23	0.23	0.00	0
16	2	0.48	0.47	0.00	-1
16	3	0.48	0.49	0.02	3
16	4	0.52	0.55	0.03	5
16	5	0.58	0.61	0.03	5
16	6	0.64	0.71	0.07	10
16	7	0.69	0.76	0.08	10
16	8	0.78	0.85	0.07	8
16	9	0.74	0.78	0.04	6
16	10	0.60	0.62	0.02	3
16	11	0.62	0.63	0.01	2
16	12	0.68	0.75	0.06	9
16	13	0.60	0.59	-0.01	-2
16	14	0.65	0.70	0.05	8
16	15	0.62	0.64	0.02	3
16	16	0.74	0.81	0.07	9
16	17	0.79	0.80	0.01	2
16	18	0.82	0.90	0.08	9
16	19	0.82	0.79	-0.03	-4
16	20	0.74	0.80	0.07	8
16	21	0.62	0.65	0.03	4
16	22	0.50	0.51	0.01	2
16	23	0.45	0.51	0.05	11
16	24	0.24	0.25	0.01	3

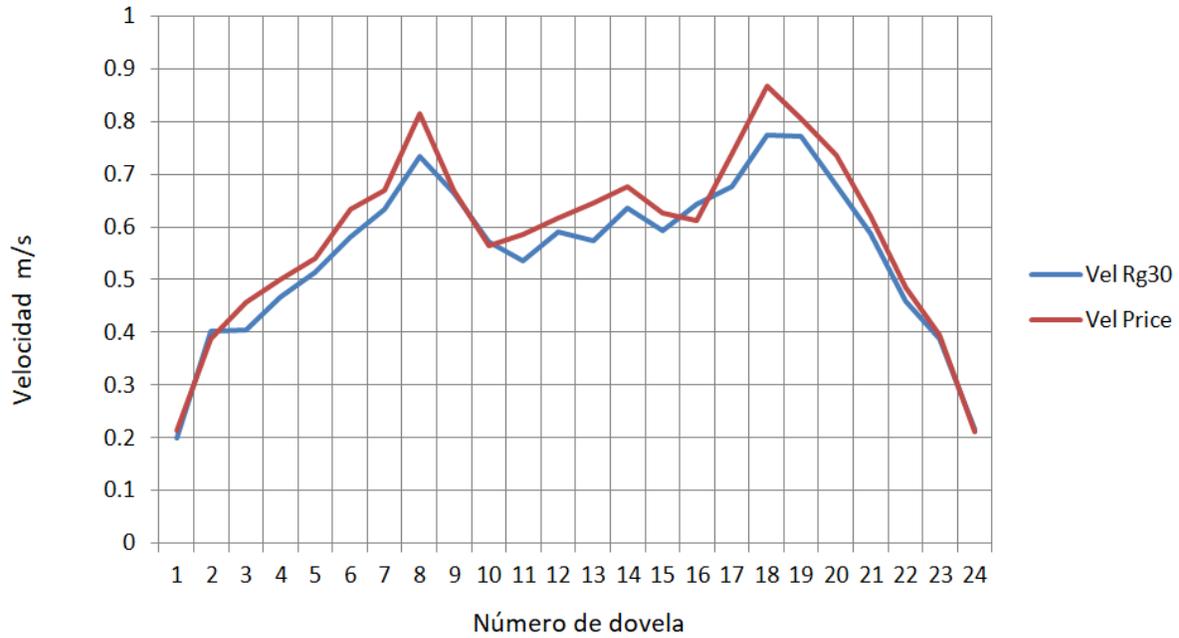
Tabla 65. Relación de velocidades del aforo 16



Gráfica 20. Relación de velocidades del aforo 17

Aforo	Dovela	Vel RG30	V Price	Dif	Dif %
17	1	0.20	0.20	0.00	-2
17	2	0.44	0.40	-0.03	-8
17	3	0.46	0.45	-0.02	-4
17	4	0.54	0.52	-0.01	-3
17	5	0.53	0.50	-0.03	-5
17	6	0.61	0.66	0.05	8
17	7	0.62	0.61	-0.01	-2
17	8	0.78	0.73	-0.05	-6
17	9	0.69	0.69	0.00	-1
17	10	0.54	0.56	0.01	3
17	11	0.58	0.53	-0.05	-10
17	12	0.57	0.61	0.03	5
17	13	0.57	0.54	-0.04	-7
17	14	0.60	0.57	-0.04	-7
17	15	0.61	0.59	-0.02	-3
17	16	0.66	0.74	0.07	10
17	17	0.73	0.69	-0.04	-6
17	18	0.84	0.76	-0.08	-11
17	19	0.79	0.74	-0.05	-7
17	20	0.70	0.64	-0.06	-9
17	21	0.55	0.52	-0.03	-6
17	22	0.48	0.43	-0.05	-11
17	23	0.39	0.36	-0.03	-9
17	24	0.23	0.21	-0.02	-7

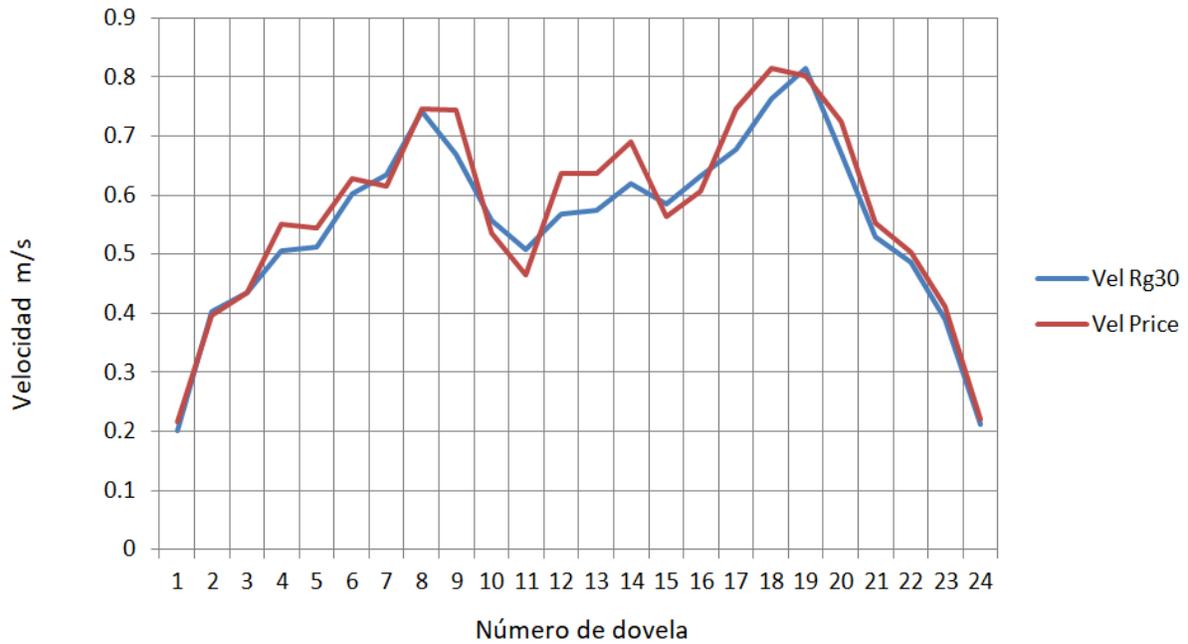
Tabla 66. Relación de velocidades del aforo 17



Gráfica 21. Relación de velocidades del aforo 18

Aforo	Dovela	Vel RG30	V Price	Dif	Dif %
18	1	0.20	0.21	0.01	7
18	2	0.40	0.39	-0.01	-4
18	3	0.41	0.46	0.05	11
18	4	0.47	0.50	0.03	7
18	5	0.51	0.54	0.03	5
18	6	0.58	0.63	0.05	8
18	7	0.63	0.67	0.03	5
18	8	0.73	0.81	0.08	10
18	9	0.67	0.67	0.00	1
18	10	0.57	0.57	-0.01	-1
18	11	0.53	0.59	0.05	9
18	12	0.59	0.62	0.03	4
18	13	0.57	0.65	0.07	11
18	14	0.64	0.68	0.04	6
18	15	0.59	0.63	0.03	5
18	16	0.64	0.61	-0.03	-5
18	17	0.68	0.74	0.06	8
18	18	0.77	0.87	0.09	11
18	19	0.77	0.80	0.03	4
18	20	0.68	0.74	0.06	8
18	21	0.59	0.62	0.03	5
18	22	0.46	0.49	0.03	5
18	23	0.39	0.39	0.01	1
18	24	0.22	0.21	-0.01	-3

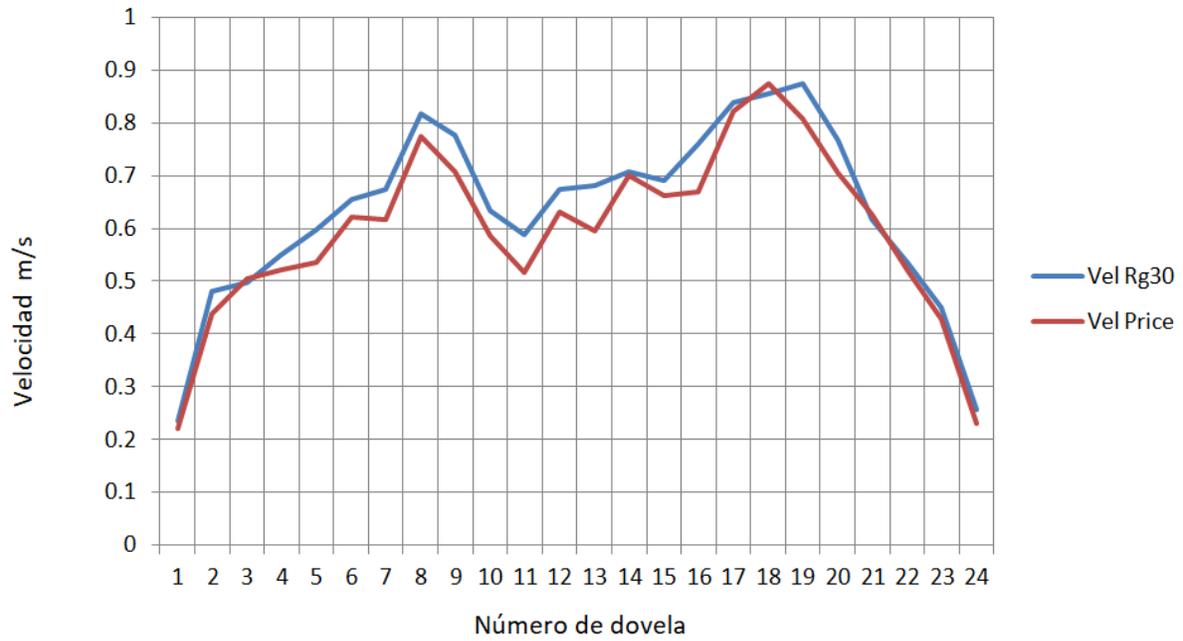
Tabla 67. Relación de velocidades del aforo 18



Gráfica 22. Relación de velocidades del aforo 19

Aforo	Dovela	Vel RG30	V Price	Dif	Dif %
19	1	0.20	0.22	0.01	7
19	2	0.40	0.40	-0.01	-2
19	3	0.44	0.43	0.00	0
19	4	0.51	0.55	0.05	8
19	5	0.51	0.54	0.03	6
19	6	0.60	0.63	0.03	4
19	7	0.63	0.62	-0.02	-3
19	8	0.74	0.75	0.00	1
19	9	0.67	0.74	0.08	10
19	10	0.56	0.54	-0.02	-4
19	11	0.51	0.46	-0.04	-9
19	12	0.57	0.64	0.07	11
19	13	0.58	0.64	0.06	10
19	14	0.62	0.69	0.07	10
19	15	0.58	0.56	-0.02	-4
19	16	0.63	0.61	-0.03	-4
19	17	0.68	0.75	0.07	9
19	18	0.76	0.81	0.05	6
19	19	0.81	0.80	-0.01	-1
19	20	0.67	0.73	0.05	7
19	21	0.53	0.55	0.02	4
19	22	0.49	0.50	0.02	3
19	23	0.39	0.41	0.02	5
19	24	0.21	0.22	0.01	3

Tabla 68. Relación de velocidades del aforo 19



Gráfica 23. Relación de velocidades del aforo 20

Aforo	Dovela	Vel RG30	V Price	Dif	Dif %
20	1	0.24	0.22	-0.01	-6
20	2	0.48	0.44	-0.04	-9
20	3	0.50	0.51	0.01	2
20	4	0.55	0.52	-0.03	-6
20	5	0.60	0.54	-0.06	-12
20	6	0.65	0.62	-0.03	-5
20	7	0.67	0.62	-0.06	-9
20	8	0.82	0.77	-0.04	-6
20	9	0.78	0.71	-0.07	-10
20	10	0.63	0.59	-0.05	-8
20	11	0.59	0.52	-0.07	-14
20	12	0.67	0.63	-0.04	-7
20	13	0.68	0.60	-0.09	-15
20	14	0.71	0.70	-0.01	-1
20	15	0.69	0.66	-0.03	-4
20	16	0.76	0.67	-0.09	-14
20	17	0.84	0.82	-0.02	-2
20	18	0.85	0.88	0.02	2
20	19	0.87	0.81	-0.07	-8
20	20	0.77	0.70	-0.06	-9
20	21	0.62	0.63	0.01	2
20	22	0.54	0.52	-0.01	-3
20	23	0.45	0.43	-0.02	-5
20	24	0.26	0.23	-0.03	-11

Tabla 69. Relación de velocidades del aforo 20



ANEXO 5. PRINCIPIO DE OPERACIÓN DE UN VEHÍCULO AÉREO NO TRIPULADO.

PRINCIPIO DE OPERACIÓN DE UN VEHÍCULO AEREO NO TRIPULADO

Antecedentes.

Es innegable la importancia de los avances de la industria aeronáutica tanto en la industria civil como en la militar en las últimas décadas. El uso de aviones y helicópteros se ha generalizado para tareas cada vez más frecuentes y en muchos casos rutinarias como: inspección de terrenos, detección y extinción de incendios, fotografía aérea, seguridad vial, etc. (Office of the Secretary of Defense, 2005)

Los UAV (Unmanned Air Vehicle) o UAS (Unmanned Aircraft System) de bajo costo aportan como ventajas frente a la aeronáutica tradicional:

1. Menor costo de la aeronave
2. Menores costos de mantenimiento
3. Menores costos de operación en general
4. Menor infraestructura para la operación (pistas de aterrizaje más reducidas, hangares más pequeños, etc.)
5. Menor costo por no necesitar piloto

El interés por los sistemas UAV se despertó hace 20 años, debido a que no se necesita un piloto a bordo de la aeronave, lo que permite el uso de aeronaves más pequeñas, con menores requerimientos de potencia. Estos sistemas pueden realizar misiones peligrosas, en entornos hostiles o bajo condiciones climatológicas adversas, sin comprometer la integridad física del piloto.



El origen del desarrollo de estos vehículos pertenece a fines militares, ya que dan la posibilidad de realizar operaciones de alto riesgo, o incluso la de sobrevolar una zona en conflicto para la vigilancia o recolección de información.

Vista la configuración aerodinámica, de apariencia novedosa, que se lleva trabajando en estos particulares sistemas desde hace años, sin embargo, en estos últimos años es cuando su pendiente desarrollo ha sido más exponencial, llegando incluso algunos de ellos a utilizarse de forma recreativa.

Existen una gran variedad de UAVs, desde vehículos de grandes dimensiones para altos vuelos y/o grandes distancias de vuelos, hasta pequeñas dimensiones llegando incluso a pocos centímetros.

El desarrollo de un UAV se basa en el tipo de acción que va a llevar a cabo, y la distancia que tendrá que recorrer. Además de dimensiones específicas, necesita de una tecnología de transmisión y vuelo necesaria para realizar la tarea.

En este punto es necesario aclarar que vehículo no tripulado, UAV, no tiene un significado autónomo, sino que estará comunicado desde un operador de tierra, sean pilotos, controladores o cualquier otro tipo de operario relacionado con la monitorización de la aeronave. Una vez superado el reto de la creación de vehículos no tripulados, se investigó en otro nivel los llamados UAS, Unmanned Aircraft System. Un UAS se trata de la evolución directa de un UAV.

Los UAVs pueden estar controlados remotamente desde una estación de tierra por un operador, en cambio, los UAS son autónomos y seguirán una trayectoria ya predefinida, o un vuelo con los recursos de los propios sensores. Existen dos estaciones que pueden manejar información del UAV, la estación de tierra y la estación a bordo del UAV. Dependiendo de cuan autónomo sea el UAV, la estación de tierra realizará más o menos funciones de forma habitual.

Tanto en la empresa privada, como a nivel público más con fines militares, se han desarrollado multitud de modelos de vehículos no tripulados para diferentes tareas los más actuales incluso de pequeñas dimensiones para un uso recreativo. Los tipos de aeronaves, son desde aviones, helicópteros o incluso dirigibles.



Aviones UAV con motor a reacción.

En uso militar predominan los UAV de tipo avión, con motores de propulsión a reacción o de pistón. Dentro de los UAV, existe otra denominación para un uso en combate, que es UCAV, Unmanned Combat Air Vehicle, denominados vehículos aéreos no tripulados de combate.

Un ejemplo de UCAV propulsado con reactores, es el Barracuda proyectado conjuntamente entre España y Alemania, a través de EADS.

Con el mismo fin de desarrollo se encuentra el X-45, creado por la empresa Americana Boeing fue parte del proyecto J-UCAS de DARPA.

Vehículos UAV con motor de pistón.

UAV con propulsión de tipo pistón se encuentra Predator, sirve principalmente en misiones de reconocimiento, pero además, tiene capacidad ofensiva con la posibilidad de incorporarle dos misiles. En la siguiente imagen además del propio avión podemos ver parte de la cabina de control de tierra, compuesta en su totalidad por una plantilla de 55 personas.

Otro modelo de un avión propulsado por hélices es el Herti de Bae Systems, este tiene como fin un ámbito militar pero también civil. La principal misión de este vehículo es la de reconocimiento.

UAV con configuraciones distintas.

UAV de tipo dirigible operado por la empresa Blackwater, empresa de ámbito privada, innovo con un vehículo dirigible no tripulado.

UAV tipo helicóptero convencional, válido tanto para misiones de uso civil o de uso militar, es el Boenig A160Hummingbird, de origen Americano, se diseñó con tecnologías avanzadas que dotan a este helicóptero para vuelos en altitudes altas.



Vehículos no tripulados de peso reducido.

Uno de los más novedoso es el Honeywell RQ-16A T-Hawk, desarrollado por Honeywell, es un pequeño UAV con un motor de gasolina propulsado por un único ventilador colocado en su centro. Su fin es la vigilancia y reconocimiento, este modelo no dispone de armas de defensa u ofensiva, pero tiene un largo alcance en proporción a su peso de solo 8.3 Kg. Su reducido peso y tamaño hace que entre dentro de la denominación MAV, del inglés, Micro Aerial Vehicle.

Su creación surgió gracias a la agencia DARPA (Agencia de Proyectos de Investigación Avanzada del Departamento de Defensa, por sus siglas en inglés), responsable de la investigación en el ámbito militar, y actualmente se sigue utilizando en Afganistán por el ejército de los EEUU. Al ser un vehículo no tripulado, no supone riesgo en labores de reconocimiento.

Hoy en día el uso de los Vehículos Aéreos no tripulados pueden ser descritos de la siguiente manera:

Aplicaciones de defensa. UAS MILITARES.

- Apoyo y misiones de mando, control, comunicaciones, inteligencia, vigilancia y reconocimiento.
- Evaluación de los efectos ocasionados por el empleo de armas. “Battle Damage Assesment”.
- Sistemas de combate aéreo (UCAVs).
- Reconocimiento de sustancias químicas, biológicas, radiológicas, nucleares y explosivas. CBRNEs (“Chemical, biological, radiological, nuclear and enhanced explosives”).

Aplicaciones de Seguridad

- Lucha contra actividades ilegales, inmigración, narcotráfico, piratería, tráfico de armas, etc.
- Apoyo a misiones humanitarias.



- Vigilancia de infraestructuras críticas como aeropuertos, instalaciones industriales o logísticas estratégicas y obras lineales como líneas de telecomunicación y eléctricas, oleoductos, conducciones de gas, etc.
- Vigilancia de fronteras y costas.
- Salvamento y vigilancia marítima. Supervisión de movimiento.

Aplicaciones Civiles.

- Gestión de emergencias de desastres naturales
- Monitorización medioambiental
- Aplicaciones científicas: Observación e investigación del clima, geofísica, flora y fauna.
- Agricultura, pesca y recursos forestales: Inventarios, vigilancia, fumigación y localización de bancos de pesca.
- Cartografía y catastro
- Fotografía aérea y cinematografía
- Vigilancia de tráfico.
- Telecomunicaciones
- Realización de pruebas escala en ingeniería aerodinámica.

Hasta hace poco tiempo, desarrollar un vehículo aéreo en escala miniatura y controlado de manera autónoma era un sueño de muchos investigadores, los cuales estaban limitados por las restricciones impuestas por el hardware hasta entonces existente. Lo que hizo posible la construcción de robots aéreos autónomos fue los recientes avances tecnológicos en actuadores y sensores en escala reducida (MEMS - Micro Electromechanical Systems), así como en el almacenamiento de energía y en el procesamiento de datos.

Además, el desarrollo de sistemas de control para este tipo de vehículos no es trivial, debido principalmente a la dinámica tan compleja inherente en los sistemas aerodinámicos, los cuales son multivariables, subactuados y además presentan diversas



características no lineales. Esto significa que las leyes clásicas de control lineales y monovariables pueden tener muy limitada su cuenca de atracción, provocando inestabilidades cuando se opera en condiciones no muy lejanas a las de equilibrio. Por otra parte, las técnicas desarrolladas para robots totalmente actuados tampoco se aplican directamente al caso de sistemas mecánicos no lineales subactuados.

Para aumentar tanto la fiabilidad como las prestaciones de estos sistemas, se suele requerir estrategias de control avanzadas que permitan tener en cuenta, por una parte, la complejidad de estos sistemas, y por otra, las incertidumbres propias de cualquier modelado. Tales requisitos pueden ser posibles utilizando técnicas de modelado no lineal y de teoría de control no lineal moderna, lo que permite alcanzar un alto desempeño en vuelos autónomos (Castillo et al., 2005), y en distintas condiciones de vuelo (vuelo estacionario, vuelo en punto fijo, aterrizaje/despegue, etc).

Los objetivos de un sistema de control de vuelo pueden clasificarse en tres fases, en función de la autonomía que alcance el sistema:

Sistema para incrementar la estabilidad (del inglés SAS: Stability Augmentation Systems): Este tipo de sistemas persigue ayudar al pilotaje del vehículo, estabilizando el sistema con un control de bajo nivel. Así se evita que el piloto deba actuar con base en el comportamiento dinámico de un sistema, que una vez alejado de cierto punto de equilibrio, deja de ser intuitivo para el razonamiento humano.

Sistemas para incrementar el comportamiento (del inglés CAS: Control Augmentation Systems): Estos sistemas están en un nivel jerárquico superior a los SAS. Además de estabilizar al vehículo, estos sistemas deben ser capaces de proporcionar una respuesta con ciertas prestaciones a referencias que, de el piloto, como por ejemplo, el seguimiento del ángulo de cabeceo.



Sistemas de pilotaje automático (del inglés Autopilots): Constituyen el nivel de control jerárquicamente superior. Son sistemas de control totalmente automáticos que son capaces de realizar por sí solos ciertos tipos de maniobras, como por ejemplo, el despegue, el aterrizaje, o vuelo estacionario a cierta altura.

En el ámbito del control de vuelo, uno de los sistemas más estudiados han sido los aviones. Sin embargo, uno de los conceptos que normalmente se utilizan para desarrollar leyes de control aplicadas a un AUV es el VTOL (Vertical Take-Off and Landing). Un tipo de aeronave muy referenciada en el Ámbito de control es el helicóptero en la configuración de cuatro hélices. En comparación con los aeroplanos, este tipo de aeronave posee una mayor agilidad para maniobrar. Sin embargo, su control se hace mucho más complejo, entre otros motivos, por la mayor inestabilidad de su dinámica.

Según Castillo et al. (2005), este tipo de helicóptero consigue un vuelo estacionario estable y preciso a través del balance de las fuerzas de propulsión ejercidas por las cuatro hélices accionadas por sus respectivos motores eléctricos.

Son muchas las ventajas que tienen este tipo de helicóptero con respecto a las de uno convencional, entre ellas se pueden citar las siguientes:

- El aumento de la capacidad de carga debido a la suma de los empujes generados por los cuatro rotores;
- La alta maniobrabilidad, lo cual permite el despegue y el aterrizaje, así como vuelos en entornos complicados;
- La sencillez del diseño mecánico, lo cual proporciona el control del movimiento a través de accionamiento directo de los rotores variando sus velocidades. En un helicóptero convencional, la velocidad de giro de las hélices suele ser constante, controlando el movimiento mediante la variación de los ángulos de ataque de las palas (cíclico y colectivo). Esto requiere transmisiones entre los rotores, además de elementos mecánicos de precisión para poder variar los mencionados ángulos;



- Los motores eléctricos en lugar de motores de combustión, lo cual hace de estos helicópteros un vehículo especialmente interesante para su uso en el interior de edificios, ya que no contaminan el aire con residuos de la combustión.

Como desventajas, este tipo de helicóptero presenta un aumento de peso y mayor consumo de energía debido a los motores extras.

Desde el punto de vista de control, la construcción de este tipo de helicóptero miniatura está lejos de simplificar el problema: más bien sucede lo contrario. Esto se debe a que los pares y fuerzas necesarios para controlar el sistema son aplicados no sólo a través de efectos aerodinámicos, sino también a través del efecto de acoplamiento que aparece entre la dinámica de los rotores y la del cuerpo de la maqueta, como consecuencia del principio de acción-reacción originado en la aceleración y desaceleración de los grupos motor-hélice (efecto que no sucede en el control con velocidad de hélices constantes).

AERODINÁMICA

Descripción de un AUV.

Un helicóptero es un aparato más pesado que el aire que no se eleva utilizando alas fijas sino mediante uno o varios rotores motorizados que giran alrededor de ejes verticales situados sobre el fuselaje. El helicóptero fue el primer tipo de aparato más pesado que el aire capaz de realizar un vuelo vertical.

Un avión está compuesto fundamentalmente por tres partes principales: fuselaje, alas y timones de dirección. Para que el avión vuele, éste debe estar en movimiento dentro de una masa de aire y dicho movimiento proporciona la sustentación del mismo a través de las alas.

Lo importante para lograr una fuerza de sustentación es el movimiento relativo entre alas y aire. Por lo contrario, en un helicóptero, se presenta movimiento permanente de alas

dentro de una masa de aire. Las alas de un helicóptero son llamadas aspas o palas del rotor principal. Las aspas del rotor tienen una forma aerodinámica similar a la de las alas de un avión; es decir, curvadas formando una elevación en la parte superior, y lisas o incluso algo cóncavas en la parte inferior. Al girar el rotor la forma de las palas las empuja hacia arriba y con ello al helicóptero. La velocidad del rotor principal es prácticamente constante; lo que hace que un helicóptero ascienda o descienda, es el ángulo de incidencia (inclinación) que tiene cada pala del rotor: a mayor inclinación, mayor empuje y viceversa.

El rotor de un helicóptero tiene normalmente dos o más palas dispuestas simétricamente alrededor de un eje central que las sujeta durante el giro. El rotor está impulsado por un motor, por lo general situado en el fuselaje, a través de unos engranajes que reducen la velocidad de rotación. Una característica importante del diseño de los helicópteros es el desarrollo de sistemas para contrarrestar el par de fuerzas, o fuerza de reacción, que se produce cuando la rotación del rotor en un sentido tiende a girar al fuselaje en el sentido contrario. La forma más común de sistema antipar es una hélice más pequeña (rotor de cola) en un lado de su parte posterior. Este rotor está instalado verticalmente y compensa con su empuje la tendencia a girar del helicóptero.

En la Ilustración A5.1, se presentan las partes principales que constituyen un helicóptero. La sustentación se logra a través de un diseño aerodinámico adecuado de cada uno de estos elementos. Todas las partes son diseñadas de tal forma que al momento del vuelo, existan las condiciones de control que sean capaces de equilibrar las tres fuerzas principales involucradas en el sistema: empuje/sustentación, peso y resistencia.

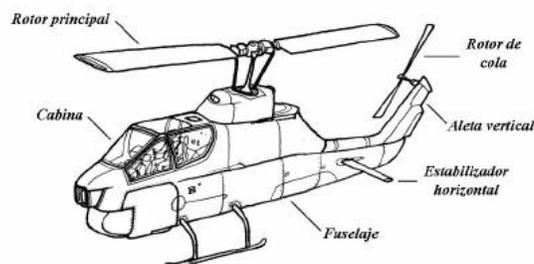


Ilustración A5.1

Un helicóptero puede desarrollar varios tipos de vuelo. Algunos de ellos son imposibles de realizarse en otro tipo de aeronave, lo que le proporciona al helicóptero ventajas sustanciales en sus diferentes aplicaciones. La figura A5.2 muestra los diferentes modos de vuelo de un helicóptero, donde destacan el modo de reversa y el vuelo estacionario, como exclusivos de este tipo de vehículo.

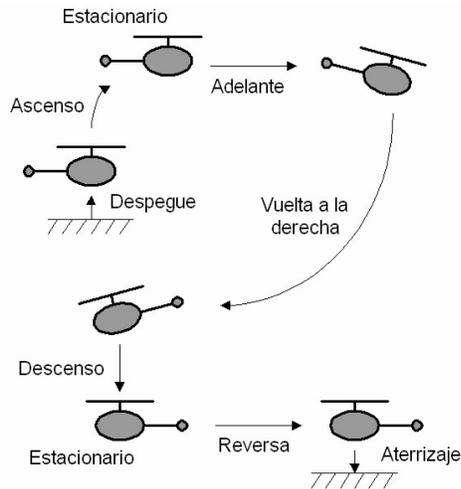


Ilustración A5.2.

Un helicóptero es un sistema de seis grados de libertad. Los grados de libertad describen la posibilidad de movimiento de un cuerpo. Un mecanismo que tiene plena libertad de movimiento posee seis grados de libertad. Tres son de traslación; para moverse en cada una de las tres dimensiones. Los otros tres grados de libertad son de rotación; para cambiar el ángulo de inclinación alrededor de los tres ejes perpendiculares que se trazan de forma longitudinal, transversal y vertical al fuselaje. Los seis grados de libertad posibles en un helicóptero se definen como sigue, y cada uno de ellos está asociado a una variable de estado del sistema:

- Traslación longitudinal (x). Es el movimiento hacia adelante y hacia atrás.
- Traslación lateral (y). Es el movimiento a la derecha y a la izquierda.
- Traslación vertical (z). Es el movimiento de ascenso y descenso. Determina la altitud del vehículo.



- Rodaje (ϕ). Es la rotación alrededor del eje imaginario trazado a lo largo del vehículo desde la cola a la nariz.
- Cabeceo (θ). Es la rotación alrededor del eje imaginario transversal al cuerpo del vehículo.
- Guiñada (ψ). Es la rotación alrededor del eje imaginario trazado paralelo al eje del rotor.

Los tres grados de libertad para rotación constituyen los llamados ángulos de Euler. Los ángulos de Euler son una forma de representar rotaciones en el espacio Euclidiano tridimensional como un producto de tres rotaciones sucesivas en dos dimensiones, alrededor de los ejes X, Y, y Z.

Las seis variables de estado definidas son las más importantes en el control de un helicóptero, ya que determinan la posición y la orientación del aparato en el espacio tridimensional.

Sin embargo, la velocidad de cambio de dichas variables también es importante.

Para cuestiones de control, regularmente se requiere conocer las velocidades lineales (\dot{x} , \dot{y} , \dot{z}) y las velocidades angulares (p , q , r).

El movimiento del UAV se origina a partir de los cambios de velocidad de los rotores. Cada rotor consta de un motor eléctrico de corriente continua, un mecanismo de engranaje y un rotor de palas, ver ilustración A5.3 Para lograr movimiento hacia adelante la velocidad del rotor trasero debe ser aumentada y, simultáneamente, la velocidad del rotor delantero debe ser disminuida. El desplazamiento lateral se ejecuta con el mismo procedimiento, pero usando los rotores de la derecha y de la izquierda. El movimiento de guiñada (yaw) se obtiene a partir de la diferencia en el par de torsión entre cada par de rotores, o sea, se acelera dos rotores con sentido horario mientras se desacelera los rotores con sentido anti-horario y viceversa.

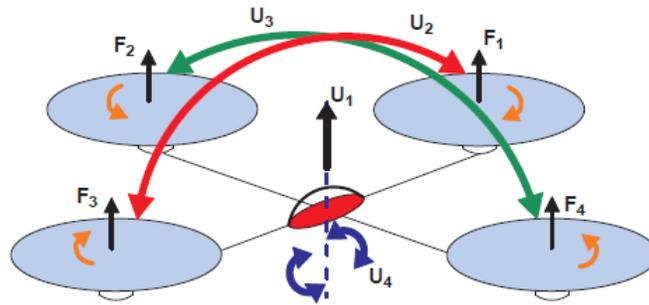


Ilustración A5.3.

El modelo dinámico de un helicóptero de cuatro hélices se puede presentar bajo dos formulaciones matemáticas: la de Newton-Euler y la de Lagrange-Euler.

Para obtener tal modelo dinámico se supone el vehículo como un cuerpo rígido en el espacio, sujeto a una fuerza principal (empuje) y tres momentos (pares). En la ilustración A5.4 se muestran las fuerzas que ejercen las distintas hélices para generar el movimiento del vehículo.

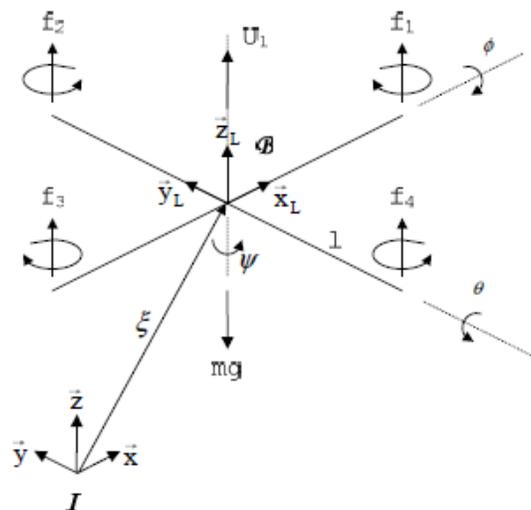


Ilustración A5.4

El par para generar un movimiento de balanceo o de roll (ángulo ϕ) se realiza mediante un desequilibrio entre las fuerzas f_2 y f_4 , Para el movimiento de cabeceo o de pitch (ángulo θ), el desequilibrio se realizará entre las fuerzas f_1 y f_3 .



El movimiento en el ángulo de guiñada o de yaw (ángulo ψ) se realizará por el desequilibrio entre los conjuntos de fuerzas (f_1, f_3) y (f_2, f_4). Este movimiento será posible ya que los rotores 1 y 3 giran en sentido contrario a los rotores 2 y 4. Finalmente, el empuje total, que hará que el helicóptero se desplace perpendicularmente al plano de los rotores, se obtendrá como suma de las cuatro fuerzas que ejercen los rotores.

Estos tipos de vehículos son sistemas de vuelo de estructura ligera, por lo que el modelo dinámico debe incluir los efectos giroscópicos resultantes tanto del cuerpo rígido rotando en el espacio, como de la rotación de las cuatro hélices (Bouabdallah et al., 2004a).

Un helicóptero es un sistema mecánico subactuado con 6 grados de libertad y solamente 4 entradas de control. Debido a las diversas complejidades presentadas, se deben realizar algunas consideraciones para determinar el modelo de control adecuado, tal como se sugiere en Koo y Sastry (1999). Así, se despreciarán los efectos de los momentos causados por el cuerpo rígido sobre las dinámicas traslacionales, así como el efecto suelo. El centro de masa se asume coincidente con el origen del sistema de coordenadas fijo al helicóptero, y se supone que la estructura del helicóptero es simétrica, lo que resulta en la matriz de inercia diagonal.

Un helicóptero tiene cuatro entradas de control: cíclico longitudinal y cíclico lateral para movimientos horizontales en sus direcciones respectivas, colectivo para movimiento vertical, y pedales de antitorque para movimiento de guiñada.

En helicópteros de tamaño real existen dos palancas; una de las cuales es sólo el control colectivo y la otra es el control cíclico longitudinal y lateral simultáneamente. La entrada de pedales debe su nombre a que en realidad existen mecanismos para su manipulación con los pies. Para helicópteros en miniatura las entradas se proporcionan mediante las palancas de un radio control.

El helicóptero, como sólido rígido, está caracterizado por un sistema de coordenadas ligado a él y con origen en su centro de masa. Este sistema se define considerando $B =$



$\{\tilde{x}_L, \tilde{y}_L, \tilde{z}_L\}$ como el sistema de coordenadas fijo al helicóptero, donde el eje \tilde{x}_L es la dirección normal de ataque del helicóptero, \tilde{y}_L es ortogonal a \tilde{x}_L y es positivo hacia estribor en el plano horizontal, mientras que \tilde{z}_L está orientado en sentido ascendente y ortogonal al plano $\tilde{x}_L\tilde{y}_L$. El sistema de coordenadas inercial $I = \{\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z}\}$

SISTEMAS DE CONTROL

La palabra control tiene un significado muy amplio. Para la descripción del vuelo del cuadricóptero se definirá como la acción ejercida con el fin de mantener una variable dentro de un rango de valores predeterminados. Por lo tanto, para controlar la orientación de un vehículo y que éste sea capaz de ejecutar la rutina de vuelo deseada es necesario obtener un modelo matemático longitudinal del vehículo lo que permitirá conocer su modelo dinámico, que no es más que una descripción matemática del modelo físico.

Las funciones primarias de los cuatro comandos principales de un helicóptero son las siguientes: las entradas cíclico lateral y longitudinal controlan los momentos de rodaje y cabeceo producidos por el rotor principal; la entrada colectivo controla la magnitud de la fuerza de empuje del rotor principal; la entrada colectivo del rotor de cola (pedales) controla la fuerza de empuje del rotor de cola. De esta manera, los comandos tienen un efecto directo sobre la velocidad de rodaje y cabeceo, velocidad vertical y velocidad de guiñada, respectivamente.

El piloto no controla la posición o la velocidad directamente, sino a través de una cadena de efectos que pueden resumirse como sigue. Las entradas de control cíclico resultan en variación del momento aplicado sobre el centro del disco del rotor, mediante un movimiento de inclinación de dicho disco. El disco del rotor es el que las hélices describen en su movimiento y es usado como una representación simplificada de los efectos combinados del movimiento individual de aspas. El control de momento del rotor produce un movimiento de rodaje y cabeceo del fuselaje. Si el helicóptero está en vuelo



estacionario, cambiar los ángulos de rodaje y cabeceo del fuselaje, resultará en una inclinación del vector de fuerza de empuje del rotor; esto produce componentes de empuje horizontales que actúan como fuerzas de propulsión. Por ejemplo, al mantener un ángulo de cabeceo constante, el helicóptero acelerará hasta que la fuerza de propulsión es balanceada por las fuerzas aerodinámicas de resistencia. En estado estable, un ángulo de cabeceo o rodaje constante se traduce en una velocidad longitudinal o lateral también constante.

Al momento de manipular las entradas para lograr un movimiento, otros efectos también necesitan ser compensados. Dichos efectos son llamados secundarios y son consecuencias indirectas producidas por los controles.

Algunos de los efectos secundarios, o efectos de ejes cruzados, se aprecian fácilmente en el control de velocidad longitudinal. Cuando el helicóptero es inclinado hacia el frente, la componente de empuje vertical decrecerá, requiriendo un incremento en la magnitud de la fuerza de empuje para mantener el nivel de altitud del vehículo. Sin embargo, este incremento en el empuje producirá un torque de reacción en el eje del rotor, que a su vez resultará en un momento de guiñada, para lo cual, el piloto necesitará ajustar el empuje del rotor de cola.

Otros efectos son más sutiles, tales como la respuesta del rodaje, producto de las acciones de control cíclico longitudinal y colectivo, y la respuesta del cabeceo respecto a la acción de control cíclico lateral; por ejemplo, cuando un helicóptero vuela en ascenso se mueve a la derecha y la nariz también gira a la derecha. La fuerza de empuje del rotor de cola también puede causar un movimiento lateral y un momento de rodaje. Con esto, se observa que un objetivo de movimiento no se alcanza con el comando de sólo en una entrada, sino que es necesario maniobrar otras entradas simultáneamente para compensar los acoplamientos cruzados.

Además de que un helicóptero es modelado como un sistema no lineal de mediano orden, las principales características que presentan dificultades en el diseño de controles de vuelo para estos vehículos, se exponen a continuación:

Dinámicas de vuelo cambiantes: Las dinámicas de vuelo cambian dependiendo del tipo de vuelo desarrollado. En vuelo estacionario, un helicóptero se comporta de forma similar sobre los ejes lateral y longitudinal. La tarea de control en este tipo de vuelo es posicionar al helicóptero en el sistema de coordenadas cartesianas. Para esto, intervienen cuatro grados de libertad, que son las posiciones longitudinal, lateral y vertical, además de la guiñada. En el caso ideal, las cuatro entradas proporcionan control independiente sobre estos cuatro grados de libertad. En contraste, en vuelo hacia adelante, el comportamiento del helicóptero es cercano al de una aeronave de alas fijas: el helicóptero es orientado de acuerdo a la dirección de movimiento; la entrada cíclico longitudinal actúa como un elevador; la entrada cíclico lateral actúa como los alerones; los pedales como timón de dirección y la entrada colectiva permite cambiar la altitud independientemente del ángulo de ataque de la nave. De forma similar a un aeroplano, el comportamiento del vehículo puede ser dividido en dinámica lateral-direccional y longitudinal-vertical. Con esto, se observa que un control lineal en vuelo estacionario no será efectivo más allá de cierta velocidad de vuelo.

Comportamiento multivariable: Un helicóptero, con sus seis grados de libertad y cuatro variables de control, es un sistema multivariable, que además se clasifica como un sistema subactuado. El hecho de que exista un mayor número de grados de libertad en comparación con las entradas de control, crea diversos acoplamientos entre las dinámicas del sistema. Para lograr una respuesta adecuada, se requiere una coordinación precisa de los controles de entrada.

Inestabilidad: Las dinámicas de orientación de un helicóptero son condicionalmente estables; se requiere una mínima cantidad de realimentación de orientación para que el sistema sea estable; sin embargo, una realimentación muy fuerte desestabiliza al sistema.



Dinámicas de alto orden: Los helicópteros, a diferencia de la mayoría de las aeronaves de alas fijas no pueden ser modelados de manera precisa sólo por las dinámicas de cuerpo rígido; es necesario incluir las dinámicas de batimiento del rotor, el sistema de comando del motor, las dinámicas del flujo de aire interior y otras componentes, tales como la barra estabilizadora.

Sensibilidad a perturbaciones: El rotor principal es sensible a perturbaciones atmosféricas. Las ráfagas de viento cambian las condiciones aerodinámicas en el rotor y consecuentemente afectan la sustentación local en las aspas. Este tipo de perturbaciones son no medibles, ya que son detectadas después de que han afectado la respuesta del vehículo.

Componentes para el Control

Se denomina Central Inercial (IMU) al conjunto de sensores que proporcionan la medición de la posición angular del vehículo (ϕ, θ, ψ) , así como su velocidad angular $(\dot{\phi}, \dot{\theta}, \dot{\psi})$, todo esto es posible gracias a los acelerómetros y girómetros respectivamente, que conforman la central inercial.

Los acelerómetros son sensores que miden la aceleración lineal en una, dos o tres dimensiones, esto es, en tres dimensiones del espacio ortonormal, es decir, en tres direcciones perpendiculares entre sí. Esta característica permite medir la inclinación de un cuerpo, puesto que es posible determinar con el acelerómetro la componente de la aceleración provocada por la gravedad que actúa sobre el cuerpo.

Un acelerómetro también es usado para determinar la posición angular de un cuerpo, a partir de la medición de su aceleración. Por otro lado, el girómetro, es un dispositivo formado esencialmente por un cuerpo con simetría de rotación que gira alrededor de su eje de simetría. Cuando se somete el giroscopio a un momento de fuerza que tiende a



cambiar la orientación del eje de rotación. Su eje de rotación, en lugar de cambiar de dirección como lo haría un cuerpo que no girase, cambia de orientación en una dirección perpendicular a la a la dirección intuitiva. Con los gyros o girómetros podemos medir la rapidez con la que cambia un objeto y poder así conocer la velocidad angular del objeto. Una central inercial típica consta de 3 acelerómetros en los ejes x,y,z y 3 gyros en los mismos ejes.

El magnetómetro. También conocido como compás, es una brújula diseñada específicamente para los robots como una ayuda a la navegación. El magnetómetro utiliza un sensor de campo magnético que sea lo suficientemente sensible para detectar el campo magnético terrestre. A su vez, este sensor está orientado hacia el norte magnético, no hacia el norte geográfico.

El magnetómetro tiene la función de controlar la orientación del vehículo sobre el eje Yaw. Para realizar el control en este eje, cuando el vehículo se está desviando de la orientación deseada el gyro detiene el movimiento de la superficie de control y el magnetómetro vuelve a orientar al vehículo al punto deseado.

Microcontrolador. El microcontrolador es un circuito integrado o chip que incluye en su interior las tres unidades funcionales de una computadora: Unidad central de procesamiento, memoria y periféricos de E/S. El microcontrolador procesa las señales provenientes de la central inercial, del magnetómetro y además controla los servomotores. Es en este dispositivo donde se programan los algoritmos de control para realizar los vuelos.



ANEXO 6 NORMATIVIDAD PARA EL USO DE UNA AERONAVE NO TRIPULADA.

El 29 de abril del 2015 la SCT emitió un comunicado con las establecidas para el uso de aeronaves no tripuladas RPAS, comúnmente conocidos como “drones”.

En este comunicado:

- **Se privilegia la seguridad del público y de los usuarios**
- **Sólo pueden ser usados lejos de los aeropuertos y helipuertos**
- **Las nuevas normas son obligatorias para todos**

Debido al creciente uso de aeronaves no tripuladas, conocidas como drones, la Secretaría de Comunicaciones y Transportes ha actualizado y fortalecido los criterios que regulan su operación, a fin de preservar la seguridad del público y también, por supuesto, de los operadores de esas aeronaves.

La Dirección General de Aeronáutica Civil (DGAC) de la SCT emitió, el pasado 8 de abril, la circular CO AV 23/10 R2, que sustituye la emitida en el 2010. Este documento es de observación obligatoria para todos los operadores civiles de esas naves.

El documento establece limitaciones al uso de drones no tripuladas (llamadas Sistemas de Aeronave Pilotada a Distancia, RPAS) según su peso, pero incluye limitantes válidas para todos los equipos.

Por ejemplo, sin importar el peso, sólo pueden ser operadas durante el día, en áreas no clasificadas como prohibidas, restringidas o peligrosas, y al menos a 9.2 kilómetros de los aeropuertos controlados, a 3.7 kilómetros de los aeródromos no controlados, y a 900 metros de los helipuertos, y no deben dejar caer objetos que puedan causar daños a personas o bienes.

La circular distingue tres tipos de drones: de hasta dos kilogramos de peso, de más de dos a 25 kilogramos, y de más de 25 kg. En los tres casos, los operadores, sean personas físicas o morales, están obligados a respetar todas las leyes, los reglamentos y las normas federales y locales aplicables.



Sólo los RPAS que pesen menos de 2 kg pueden ser operados sin necesidad de requerir autorización de la DGAC, pero si se usan para actividades comerciales deben contar con un seguro de daños a terceros, entre otras condicionantes.

En cuanto a los que pesan más de 2 kg, cuando su uso es recreativo, sólo pueden ser usados dentro de clubes de aeromodelismo. Los de uso comercial requieren autorización de la DGAC. Las limitaciones son aún más específicas para operar aparatos de más de 25 kilogramos de peso, que sólo pueden volar en los términos y condiciones autorizados por la DGAC, además de que su operador debe contar con una licencia de piloto.

La publicación de esta circular forma parte del esfuerzo permanente de la SCT para actualizar la regulación del sector conforme los avances de la tecnología.

En la Circular emitida a su vez por la Dirección General de Aeronáutica Civil se establecen los requerimientos para operar un sistema de aeronave pilotada a distancia (RPAS)

En el apartado 7 se realiza una clasificación de los Sistemas de Aeronaves Pilotadas a Distancia (RPAS) y Requerimientos y limitaciones generales.

Tabla 70. Clasificación de Sistemas de Aeronaves Pilotadas a Distancia.

CLASIFICACIÓN DE SISTEMAS DE AERONAVES PILOTADAS A DISTANCIA		
PESO MÁXIMO DE DESPEGUE	DENOMINACIÓN	USO
2 kg o menos	RPAS Micro	Recreativo
		Comercial
Más de 2 kg hasta 25 kg	RPAS Ligero	Recreativo
		Comercial
Más de 25 kg	RPAS pesado	Recreativo
		Comercial

Los requerimientos y limitaciones generales para todas las categorías y tipos de uso de RPAS son los siguientes:



- a) Ningún operador puede dejar caer y/o aventar (aunque tenga paracaídas) desde el RPA cualquier objeto o material que pueda causar daño a cualquier persona o propiedad.
- b) La persona a cargo de un RPAS no puede operar la aeronave si el vuelo no puede hacerse de manera segura. Esta condición debe determinarse en una inspección de prevuelo. (Apéndice E Informativo)
- c) En todo momento deberán operar en el espacio aéreo clase G, salvo que exista la estricta y previa coordinación con los Servicios de Tránsito Aéreo.
- d) No deben operar en las áreas prohibidas, restringidas o peligrosas, establecidas en la Publicación de Información Aeronáutica (PIA) de México. Sección ENR 5.1 así como las que determine la autoridad aeronáutica como prohibidas, restringidas o peligrosas para operación del RPAS.
- e) Los RPAS no deben utilizarse para transportar mercancías peligrosas y/o sustancias prohibidas por la ley, ni para emplear o transportar armas o explosivos.
- f) El operador debe mantener el control de la trayectoria de vuelo de la aeronave pilotada a distancia en todo momento.
- g) El operador de un RPAS es el responsable de su operación, uso y en caso de accidente, de los daños causados por la misma.
- h) El operador de un RPAS es el responsable del mal uso que se dé a la información obtenida durante la operación de la aeronave.
- i) El operador de un RPAS es el responsable de respetar todas las Leyes, Reglamentos y Normas de índole Federal o Local, relacionadas con Seguridad Nacional, Seguridad Pública. Protección de la privacidad, propiedad intelectual, entre otras.
- j) La persona a cargo del RPAS, no debe operar el RPAS de una manera negligente o temeraria que ponga en peligro la vida o la propiedad de terceros.
- k) Los RPAS deben ser operados durante las horas oficiales entre la salida y la puesta del sol, salvo que obtengan una autorización especial de parte de la autoridad aeronáutica para vuelos nocturnos o IFR.



- l) El operador del RPAS deberá dar en todo momento y sin excepción alguna, el derecho de paso a cualquier aeronave tripulada, a menos que el RPAS y la otra aeronave estén bajo control positivo por los Servicios de Tránsito Aéreo.
- m) El RPAS no podrá operarse desde vehículos en movimiento, a menos que el vehículo se esté moviendo sobre el agua y esto sea indispensable para su adecuada operación.
- n) Los RPAS con matrícula o registro extranjero u operados por operadores extranjeros, con fines científicos, deberán de solicitar permiso a la Secretaría de la Defensa Nacional en cumplimiento al artículo 29 fracción XVIII de la Ley Orgánica de la Administración Pública Federal.

Los requerimientos y limitaciones del RPAS ligero usado con fines comerciales son:

9.2.1 Todos los RPAS de esta categoría y uso, además de cumplir con los Requerimientos y Limitaciones del numeral 8.1.1 inciso c) y del numeral 9.1.1 incisos b), c) y d) anteriores, deben de cumplir con lo siguiente:

a) Registro y placa de identificación. Todos los RPAS de esta categoría y uso deben contar con Registro ante la Dirección General Adjunta de Transporte y Control Aeronáutico de la autoridad aeronáutica.

b) Autorización de Operación, de acuerdo al numeral 10.2.3 con excepción del inciso f)

9.2.2 Todos los RPAS de esta categoría y uso deberán de aplicar procedimientos de evasión de cualquier aeronave a fin de evitar posibles colisiones.

Los requerimientos y limitaciones enunciados del numerar 8.1.1 son los siguientes:

b) No deben operarse más allá de la línea visual del piloto al mando de la aeronave pilotaa a distancia. La aeronave no debe alejarse más de 457 m (1500 ft) de distancia horizontal del piloto al mando.

c) Debe operarse a una distancia de separación de al menos 9.2 km (5 millas náuticas) de cualquier aeropuerto controlado (a menos que se cuente con previa coordinación con los



Servicios de Tránsito Aéreo), de 3.7 km (2 millas náuticas) de cualquier aeródromo no controlado y de 0.9 km (0.5 milla náutica) de cualquier helipuerto.

De acuerdo con los requisitos del numeral 10.2.3. en el inciso c) se requiere de una Licencia del personal operativo, como piloto RPAS, documento que deberá tramitar de acuerdo al Apéndice C Normativo del documento en cuestión:

C.1. CAPACITACIÓN PILOTO / OBSERVADOR DE LA AERONAVE PILOTADA A DISTANCIA

C.2 REQUERIMIENTOS MÍNIMOS PARA PILOTO / OBSERVADOR DE LA AERONAVE PILOTADA A DISTANCIA (RPA)

a) Requerimiento de Evaluación y Certificación del Piloto al Mando (PIC) de Sistema de Aeronave Pilotada a Distancia (RPAS)

1. El piloto / observador de RPAS (PIC) debe poseer al menos, capacitación teórica aprobada de piloto privado, sea de avión o de helicóptero o el equivalente militar.
2. El piloto /observador de RPAS (PIC) debe contar al menos con el exámen de aptitud psicofísica vigente aplicable para piloto privado.
3. El piloto también debe de contar con al menos 50 horas de vuelo en el Sistema Aeronave Pilotada a Distancia (RPAS), las cuales deben ser documentadas en la bitácora de vuelo de la aeronave.



CITAS Y REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1438:2008, I. (2008). *Hydrometry -- Open channel flow measurement using thin-plate weirs.*
- Chiu Lin, C. (1992). *Application of entropy concept in open channel flow study.* Journal of Hydraulic Engineering.
- Chow, V. T. (1959). *Open Channel Hydraulics.* McGraw Hill.
- Comina, C. L., M. de Luca, A., & Sambuelli, L. (2013). Discharge measurement with salt dilution method in irrigation canals: Direct sampling and geophysical controls. *Hydrol Earth Sci Discuss.*
- IEC60041:1991. (1991). *Field acceptance tests to determine the hydraulic performance of hydraulic turbines, storage pumps and pump-turbines.*
- ISO/TR11330. (1997). *ISO/TR 11330:1997 Determination of volume of water and water level in lakes and reservoirs.*
- ISO/TR24578:2012. (2012). *Hydrometry -- Acoustic Doppler profiler -- Method and application for measurement of flow in open channels.*
- ISO1070:1992. (1992). *ISO1070:1992 Liquid flow measurement in open channels -- Slope-area method.*
- ISO3846:2008. (2008). *Hydrometry -- Open channel flow measurement using rectangular broad-crested weirs.*
- ISO3847:1977. (1977). *Liquid flow measurement in open channels by weirs and flumes -- End-depth method for estimation of flow in rectangular channels with a free overfall.*
- ISO4359:2013. (2013). *Flow measurement structures -- Rectangular, trapezoidal and U-shaped flumes.*
- ISO4360:2008. (2008). *Hydrometry -- Open channel flow measurement using triangular profile weirs.*
- ISO4362:1999. (1999). *Hydrometric determinations -- Flow measurement in open channels using structures -- Trapezoidal broad-crested weirs.*
- ISO6416:2004. (2004). *Hydrometry -- Measurement of discharge by the ultrasonic (acoustic) method.*
- ISO748:2007. (2007). *Hydrometry -- Measurement of liquid flow in open channels using current-meters or floats.*



- ISO8316. (1987). *ISO 8316:1987 Measurement of liquid flow in closed conduits -- Method by collection of the liquid in a volumetric tank.*
- ISO9826:1992. (1992). *Measurement of liquid flow in open channels -- Parshall and SANIIRI flumes.*
- Joint Committee for Guides in Metrology. (2008). *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement.*
- Kennedy Perez, A., Fragoza Díaz, F., Peña Peña, E., & Moreno Bañuelos, J. E. (1992). *Manual de Aforos.* Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Khabit, A. (2013). Development of empirical regression-based models for predicting mean velocities in asymmetric compound channels. *Flow Meas Instrument.*
- Leliavsky, S. (s.f.). *River and Canal Hydraulics.*
- SCTMEXICO. (2017). CO AV-23/10 R4 Que establece los requerimientos para operar un Sistema de aeronave pilotada a distancia.
- Vide, J. P. (1997). *Ingeniería fluvial.* Barcelona, Ediciones UPC.
- York, T. H., & Oberg, K. A. (2002). Measuring river velocity and discharge with acoustic doppler profilers.