



**UNIVERSIDAD DEL AZUAY**  
**FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL**

**Frente de Pareto de la calibración en régimen impermanente  
de un modelo hidráulico del río Yanuncay, de la ciudad de  
Cuenca.**

**Trabajo de graduación previo a la obtención del título de:**

**INGENIERA CIVIL CON ÉNFASIS EN GERENCIA DE CONSTRUCCIONES**

**Autora:**

**MARÍA GABRIELA PÉREZ JARAMILLO**

**Director:**

**CARLOS JAVIER FERNÁNDEZ DE CÓRDOVA WEBSTER**

**CUENCA, ECUADOR**

**2019**

### **DEDICATORIA**

Quiero dedicar este trabajo a mis padres: Fabián y Silvia, por el amor, trabajo y sacrificio de todos estos años, por ser los principales motivadores de mis sueños, por confiar y creer en mí, por los consejos, valores, principios y sobre todo por su apoyo incondicional.

### **AGRADECIMIENTO**

Quiero agradecer principalmente a Dios, por ser la inspiración, la fuerza y la guía para cumplir esta meta sin desfallecer, a mi padres, hermanos, sobrina, amigos y familia por sus constantes palabras de aliento y su apoyo a lo largo de este camino, también a la Universidad del Azuay, a sus docentes, en especial a mi director de tesis el Ing. Javier Fernández de Córdova por todos los conocimientos impartidos y por ser los escalones que me permitieron llegar a culminar mis estudios que serán una parte fundamental en mi vida.

**Frente de Pareto de la calibración en régimen impermanente de un modelo  
hidráulico del río Yanuncay, de la ciudad de Cuenca.**

**RESUMEN**

El proyecto consiste en obtener el coeficiente de rugosidad inicial para la calibración en régimen impermanente de un modelo hidráulico del río Yanuncay utilizando el software libre HEC-RAS, mediante el cual se obtienen los valores de altura del agua simulados en el río, que son comparados con los datos observados del mismo. Para esto se calculan varios frentes de Pareto aplicando diferentes funciones objetivo, así también, se utilizan algunas pruebas de bondad de ajuste de datos.

**Palabras Clave:** calibración, régimen impermanente, modelo, rugosidad, frente de Pareto.



---

Carlos Javier Fernández de Córdova Webster  
**Director del Trabajo de Titulación**



---

José Fernando Vázquez Calero  
**Director de la Escuela**



---

María Gabriela Pérez Jaramillo  
**Autora**

**Pareto front of the calibration in impermanent regime of a hydraulic model of the Yanuncay River of Cuenca.**

**ABSTRACT**

The project involved obtaining the initial roughness coefficient for the calibration in impermanent regime of a hydraulic model of the Yanuncay River using the HEC-RAS free software. Through this, the water height values simulated in the river were obtained and compared with the observed data. For this, several Pareto fronts were calculated applying different objective functions and some goodness-of-fit tests were used.

**Keywords:** calibration, impermanent regime, model, roughness, Pareto front.



---

Carlos Javier Fernández de Córdova Webster

**Thesis Director**



---

José Fernando Vázquez Calero

**Faculty Director**



---

María Gabriela Pérez Jaramillo

**Author**



Translated by

Ing. Paúl Arpi

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

DEDICATORIA .....	ii
AGRADECIMIENTO .....	iii
RESUMEN.....	iv
ABSTRACT .....	v
ÍNDICE DE CONTENIDOS .....	vi
ÍNDICE DE TABLAS .....	viii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	ix
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xvi
INTRODUCCIÓN .....	17
ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN .....	20
OBJETIVOS .....	21
Objetivo general .....	21
Objetivos específicos.....	21
<b>CAPÍTULO I.....</b>	<b>22</b>
<b>ESTADO DEL ARTE Y MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>22</b>
1.1. Estado del arte .....	22
1.2. Marco teórico .....	25
1.2.1. Modelación.....	25
1.2.2. Modelo hidráulico .....	25
1.2.3. Coeficiente de Rugosidad .....	26
1.2.4. Régimen permanente.....	26
1.2.5. Régimen impermanente .....	26
1.2.6. Calibración .....	27
1.2.7. Frente de Pareto.....	27
1.2.8. Simulación .....	28
<b>CAPÍTULO II .....</b>	<b>29</b>
<b>CALIBRACIÓN DEL MODELO HIDRÁULICO DEL RÍO YANUNCAY EN RÉGIMEN IMPERMANENTE Y EVALUACIÓN DEL ERROR .....</b>	<b>29</b>
2.1. Creación del modelo hidráulico del río Yanuncay .....	29
2.2. Calibración del modelo hidráulico en régimen impermanente empleando el software HEC-RAS .....	30
2.3. Criterios para evaluar el error de la calibración .....	33
2.4. Tablas obtenidas con las simulaciones .....	42

2.4.1. Evento del 9 – 12 marzo 2017.....	42
2.4.2. Evento del 12 – 14 abril 2017 .....	42
<b>CAPÍTULO III.....</b>	<b>43</b>
<b>CONSTRUCCIÓN DE LOS FRENTE DE PARETO.....</b>	<b>43</b>
3.1. Evento del 9 - 12 marzo 2017 .....	43
3.1.1. Frente de Pareto 1.....	43
3.1.2. Frente de Pareto 2.....	55
3.1.3. Frente de Pareto 3.....	68
3.2. Evento del 12 - 14 abril 2017 .....	81
3.2.1. Frente de Pareto 1.....	81
3.2.2. Frente de Pareto 2.....	92
3.2.3. Frente de Pareto 3.....	104
CONCLUSIONES .....	116
RECOMENDACIONES .....	118
BIBLIOGRAFÍA .....	119
ANEXOS .....	123

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Eventos que se van a correr en el modelo.....	32
Tabla 2.2: Coeficiente Smirnov-Kolmogorov, evento 9 – 12 marzo 2017.....	35
Tabla 2.3: Coeficiente Smirnov-Kolmogorov, evento 12-14 abril 2017. ....	37
Tabla 2.4: Valores referenciales del criterio de Nash-Sutcliffe .....	40
Tabla 2.5: Coeficiente Nash and Sutcliffe, evento 9 - 12 marzo 2017. ....	41
Tabla 2.6: Coeficiente Nash and Sutcliffe, evento 12 – 14 abril 2017. ....	41
Tabla 3.1: Resumen frente de Pareto 1, error promedio, 9-12 marzo 2017.....	44
Tabla 3.2: Resumen frente de Pareto 1, error cuadrático, 9-12 marzo 2017.....	49
Tabla 3.3: Resumen valores no dominados, frente de Pareto 1, 9-12 marzo 2017...	55
Tabla 3.4: Resumen frente de Pareto 2, error promedio, 9-12 marzo 2017.....	56
Tabla 3.5: Resumen frente de Pareto 2, error cuadrático, 9-12 marzo 2017.....	62
Tabla 3.6: Resumen valores no dominados, frente de Pareto 2, 9-12 marzo 2017...	68
Tabla 3.7: Resumen frente de Pareto 3, error promedio, 9-12 marzo 2017.....	69
Tabla 3.8: Resumen frente de Pareto 3, error cuadrático, 9-12 marzo 2017.....	75
Tabla 3.9: Resumen valores no dominados, frente de Pareto 3, 9-12 marzo 2017...	80
Tabla 3.10: Resumen frente de Pareto 1, error promedio, 12-14 abril 2017 .....	81
Tabla 3.11: Resumen frente de Pareto 1, error cuadrático, 12-14 abril 2017 .....	86
Tabla 3.12: Resumen valores no dominados, frente de Pareto 1, 12-14 abril 2017...	92
Tabla 3.13: Resumen frente de Pareto 2, error promedio, 12-14 abril 2017 .....	92
Tabla 3.14: Resumen frente de Pareto 2, error cuadrático, 12-14 abril 2017. ....	98
Tabla 3.15: Resumen valores no dominados, frente de Pareto 2, 12-14 abril 2017.	104
Tabla 3.16: Resumen frente de Pareto 3, error promedio, 12-14 abril 2017 .....	104
Tabla 3.17: Resumen frente de Pareto 3, error cuadrático, 12-14 abril 2017. ....	110
Tabla 3.18: Resumen valores no dominados, frente de Pareto 3, 12-14 abril 2017.	115

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Tramo de la modelación hidráulica del río Yanuncay.....	29
Figura 2.2. Modelo del río Yanuncay con sus subtramos.....	32
Figura 2.3. Niveles de agua en el río valores observados y simulados.....	33
Figura 2.4: n de Manning vs coeficiente Smirnov – Kolmogorov error promedio, evento 9 - 12 marzo 2017.....	35
Figura 2.5: n de Manning vs coeficiente Smirnov – Kolmogorov, error cuadrático, evento 9 - 12 marzo 2017.....	36
Figura 2.6: Nivel de agua del río, error promedio, n=0.06. ....	36
Figura 2.7: Nivel de agua del río, error cuadrático, n=0.06. ....	37
Figura 2.8: n de Manning vs coeficiente Smirnov – Kolmogorov, error promedio, evento 12 - 14 abril 2017. ....	38
Figura 2.9: n de Manning vs coeficiente Smirnov – Kolmogorov, error cuadrático, evento 12 - 14 abril 2017. ....	38
Figura 2.10: Nivel de agua del río, error promedio, n=0.06. ....	39
Figura 2.11: Nivel de agua del río, error cuadrático, n=0.06. ....	39
Figura 3.1: Función objetivo vs n de Manning, $\alpha=1, 2, 3$ y 4, error promedio, 9-12 marzo 2017.....	45
Figura 3.2: Función objetivo 1 vs función objetivo 2, $\alpha= 1$ , error promedio, 9-12 marzo 2017, con todos los valores de rugosidad. ....	45
Figura 3.3: Función objetivo 1 vs función objetivo 2, $\alpha= 1$ , error promedio, 9-12 marzo 2017, valores de interés.....	46
Figura 3.4: Función objetivo 1 vs función objetivo 2, $\alpha= 2$ , error promedio, 9-12 marzo 2017, con todos los valores de rugosidad. ....	46
Figura 3.5: Función objetivo 1 vs función objetivo 2, $\alpha= 2$ , error promedio, 9-12 marzo 2017, valores de interés.....	47
Figura 3.6: Función objetivo 1 vs función objetivo 2, $\alpha= 3$ , error promedio, 9-12 marzo 2017, con todos los valores de rugosidad. ....	47
Figura 3.7: Función objetivo 1 vs función objetivo 2, $\alpha= 3$ , error promedio, 9-12 marzo 2017, valores de interés.....	48
Figura 3.8: Función objetivo 1 vs función objetivo 2, $\alpha= 4$ , error promedio, 9-12 marzo 2017, con todos los valores de rugosidad. ....	48

Figura 3.9: Función objetivo 1 vs función objetivo 2, $\alpha=4$ , error promedio, 9-12 marzo 2017, valores de interés.....	49
Figura 3.10: Función objetivo vs n de Manning, $\alpha=1, 2, 3$ y 4, error cuadrático, 9-12 marzo 2017.....	50
Figura 3.11: Función objetivo 1 vs función objetivo 2, $\alpha=1$ , error cuadrático, 9-12 marzo 2017, con todos los valores de rugosidad. ....	51
Figura 3.12: Función objetivo 1 vs función objetivo 2, $\alpha=1$ , error cuadrático, 9-12 marzo 2017, valores de interés.....	51
Figura 3.13: Función objetivo 1 vs función objetivo 2, $\alpha=2$ , error cuadrático, 9-12 marzo 2017, con todos los valores de rugosidad. ....	52
Figura 3.14: Función objetivo 1 vs función objetivo 2, $\alpha=2$ , error cuadrático, 9-12 marzo 2017, valores de interés.....	52
Figura 3.15: Función objetivo 1 vs función objetivo 2, $\alpha=3$ , error cuadrático, 9-12 marzo 2017, con todos los valores de rugosidad. ....	53
Figura 3.16: Función objetivo 1 vs función objetivo 2, $\alpha=3$ , error cuadrático, 9-12 marzo 2017, valores de interés.....	53
Figura 3.17: Función objetivo 1 vs función objetivo 2, $\alpha=4$ , error cuadrático, 9-12 marzo 2017, con todos los valores de rugosidad. ....	54
Figura 3.18: Función objetivo 1 vs función objetivo 2, $\alpha=4$ , error cuadrático, 9-12 marzo 2017, valores de interés.....	54
Figura 3.19: Función objetivo vs n de Manning, $\alpha=1, 2, 3$ y 4, error promedio, 9-12 marzo 2017.....	57
Figura 3.20: Función objetivo 1 vs función objetivo 2, $\alpha=1$ , error promedio, 9-12 marzo 2017, con todos los valores de rugosidad. ....	57
Figura 3.21: Función objetivo 1 vs función objetivo 2, $\alpha=1$ , error promedio, 9-12 marzo 2017, valores de interés.....	58
Figura 3.22: Función objetivo 1 vs función objetivo 2, $\alpha=2$ , error promedio, 9-12 marzo 2017, con todos los valores de rugosidad. ....	58
Figura 3.23: Función objetivo 1 vs función objetivo 2, $\alpha=2$ , error promedio, 9-12 marzo 2017, valores de interés.....	59
Figura 3.24: Función objetivo 1 vs función objetivo 2, $\alpha=3$ , error promedio, 9-12 marzo 2017, con todos los valores de rugosidad. ....	59
Figura 3.25: Función objetivo 1 vs función objetivo 2, $\alpha=3$ , error promedio, 9-12 marzo 2017, valores de interés.....	60

Figura 3.26: Función objetivo 1 vs función objetivo 2, $\alpha=4$ , error promedio, 9-12 marzo 2017, con todos los valores de rugosidad. ....	60
Figura 3.27: Función objetivo 1 vs función objetivo 2, $\alpha=4$ , error promedio, 9-12 marzo 2017, valores de interés.....	61
Figura 3.28: Función objetivo vs n de Manning, $\alpha=1, 2, 3$ y 4, error cuadrático, 9-12 marzo 2017.....	63
Figura 3.29: Función objetivo 1 vs función objetivo 2, $\alpha=1$ , error cuadrático, 9-12 marzo 2017, con todos los valores de rugosidad. ....	63
Figura 3.30: Función objetivo 1 vs función objetivo 2, $\alpha=1$ , error cuadrático, 9-12 marzo 2017, valores de interés.....	64
Figura 3.31: Función objetivo 1 vs función objetivo 2, $\alpha=2$ , error cuadrático, 9-12 marzo 2017, con todos los valores de rugosidad. ....	64
Figura 3.32: Función objetivo 1 vs función objetivo 2, $\alpha=2$ , error cuadrático, 9-12 marzo 2017, valores de interés.....	65
Figura 3.33: Función objetivo 1 vs función objetivo 2, $\alpha=3$ , error cuadrático, 9-12 marzo 2017, con todos los valores de rugosidad. ....	65
Figura 3.34: Función objetivo 1 vs función objetivo 2, $\alpha=3$ , error cuadrático, 9-12 marzo 2017, valores de interés.....	66
Figura 3.35: Función objetivo 1 vs función objetivo 2, $\alpha=4$ , error cuadrático, 9-12 marzo 2017, con todos los valores de rugosidad. ....	66
Figura 3.36: Función objetivo 1 vs función objetivo 2, $\alpha=4$ , error cuadrático, 9-12 marzo 2017, valores de interés.....	67
Figura 3.37: Función objetivo vs n de Manning, $\alpha=1, 2, 3$ y 4, error promedio, 9-12 marzo 2017.....	70
Figura 3.38: Función objetivo 1 vs función objetivo 2, $\alpha=1$ , error promedio, 9-12 marzo 2017, con todos los valores de rugosidad. ....	70
Figura 3.39: Función objetivo 1 vs función objetivo 2, $\alpha=1$ , error promedio, 9-12 marzo 2017, valores de interés.....	71
Figura 3.40: Función objetivo 1 vs función objetivo 2, $\alpha=2$ , error promedio, 9-12 marzo 2017, con todos los valores de rugosidad. ....	71
Figura 3.41: Función objetivo 1 vs función objetivo 2, $\alpha=2$ , error promedio, 9-12 marzo 2017, valores de interés.....	72
Figura 3.42: Función objetivo 1 vs función objetivo 2, $\alpha=3$ , error promedio, 9-12 marzo 2017, con todos los valores de rugosidad. ....	72

Figura 3.43: Función objetivo 1 vs función objetivo 2, $\alpha=3$ , error promedio, 9-12 marzo 2017, valores de interés.....	73
Figura 3.44: Función objetivo 1 vs función objetivo 2, $\alpha=4$ , error promedio, 9-12 marzo 2017, con todos los valores de rugosidad. ....	73
Figura 3.45: Función objetivo 1 vs función objetivo 2, $\alpha=4$ , error promedio, 9-12 marzo 2017, valores de interés.....	74
Figura 3.46: Función Objetivo vs n de Manning, $\alpha=1, 2, 3$ y 4, error cuadrático, 9-12 marzo 2017.....	76
Figura 3.47: Función objetivo 1 vs función objetivo 2, $\alpha=1$ , error cuadrático, 9-12 marzo 2017, con todos los valores de rugosidad. ....	76
Figura 3.48: Función objetivo 1 vs función objetivo 2, $\alpha=1$ , error cuadrático, 9-12 marzo 2017, valores de interés.....	77
Figura 3.49: Función objetivo 1 vs función objetivo 2, $\alpha=2$ , error cuadrático, 9-12 marzo 2017, con todos los valores de rugosidad. ....	77
Figura 3.50: Función objetivo 1 vs función objetivo 2, $\alpha=2$ , error cuadrático, 9-12 marzo 2017, valores de interés.....	78
Figura 3.51: Función objetivo 1 vs función objetivo 2, $\alpha=3$ , error cuadrático, 9-12 marzo 2017, con todos los valores de rugosidad. ....	78
Figura 3.52: Función objetivo 1 vs función objetivo 2, $\alpha=3$ , error cuadrático, 9-12 marzo 2017, valores de interés.....	79
Figura 3.53: Función objetivo 1 vs función objetivo 2, $\alpha=4$ , error cuadrático, 9-12 marzo 2017, con todos los valores de rugosidad. ....	79
Figura 3.54: Función objetivo 1 vs función objetivo 2, $\alpha=4$ , error cuadrático, 9-12 marzo 2017, valores de interés.....	80
Figura 3.55: Función Objetivo vs n de Manning, $\alpha=1, 2, 3$ y 4, error promedio, 12-14 abril 2017. ....	82
Figura 3.56: Función objetivo 1 vs función objetivo 2, $\alpha=1$ , error promedio, 12-14 abril 2017, con todos los valores de rugosidad. ....	82
Figura 3.57: Función objetivo 1 vs función objetivo 2, $\alpha=1$ , error promedio, 12-14 abril 2017, valores de interés. ....	83
Figura 3.58: Función objetivo 1 vs función objetivo 2, $\alpha=2$ , error promedio, 12-14 abril 2017, con todos los valores de rugosidad. ....	83
Figura 3.59: Función objetivo 1 vs función objetivo 2, $\alpha=2$ , error promedio, 12-14 abril 2017, valores de interés. ....	84

Figura 3.60: Función objetivo 1 vs función objetivo 2, $\alpha=3$ , error promedio, 12-14 abril 2017, con todos los valores de rugosidad. ....	84
Figura 3.61: Función objetivo 1 vs función objetivo 2, $\alpha=3$ , error promedio, 12-14 abril 2017, valores de interés. ....	85
Figura 3.62: Función objetivo 1 vs función objetivo 2, $\alpha=4$ , error promedio, 12-14 abril 2017, con todos los valores de rugosidad. ....	85
Figura 3.63: Función objetivo 1 vs función objetivo 2, $\alpha=4$ , error promedio, 12-14 abril 2017, valores de interés. ....	86
Figura 3.64: Función Objetivo vs n de Manning, $\alpha=1, 2, 3$ y 4, error cuadrático, 12- 14 abril 2017. ....	87
Figura 3.65: Función objetivo 1 vs función objetivo 2, $\alpha=1$ , error cuadrático, 12-14 abril 2017, con todos los valores de rugosidad. ....	88
Figura 3.66: Función objetivo 1 vs función objetivo 2, $\alpha=1$ , error cuadrático, 12-14 abril 2017, valores de interés. ....	88
Figura 3.67: Función objetivo 1 vs función objetivo 2, $\alpha=2$ , error cuadrático, 12-14 abril 2017, con todos los valores de rugosidad. ....	89
Figura 3.68: Función objetivo 1 vs función objetivo 2, $\alpha=2$ , error cuadrático, 12-14 abril 2017, valores de interés. ....	89
Figura 3.69: Función objetivo 1 vs función objetivo 2, $\alpha=3$ , error cuadrático, 12-14 abril 2017, con todos los valores de rugosidad. ....	90
Figura 3.70: Función objetivo 1 vs función objetivo 2, $\alpha=3$ , error cuadrático, 12-14 abril 2017, valores de interés. ....	90
Figura 3.71: Función objetivo 1 vs función objetivo 2, $\alpha=4$ , error cuadrático, 12-14 abril 2017, con todos los valores de rugosidad. ....	91
Figura 3.72: Función objetivo 1 vs función objetivo 2, $\alpha=4$ , error cuadrático, 12-14 abril 2017, valores de interés. ....	91
Figura 3.73: Función Objetivo vs n de Manning, $\alpha=1, 2, 3$ y 4, error promedio, 12-14 abril 2017. ....	93
Figura 3.74: Función objetivo 1 vs función objetivo 2, $\alpha=1$ , error promedio, 12-14 abril 2017, con todos los valores de rugosidad. ....	94
Figura 3.75: Función objetivo 1 vs función objetivo 2, $\alpha=1$ , error promedio, 12-14 abril 2017, valores de interés. ....	94
Figura 3.76: Función objetivo 1 vs función objetivo 2, $\alpha=2$ , error promedio, 12-14 abril 2017, con todos los valores de rugosidad. ....	95

Figura 3.77: Función objetivo 1 vs función objetivo 2, $\alpha=2$ , error promedio, 12-14 abril 2017, valores de interés. ....	95
Figura 3.78: Función objetivo 1 vs función objetivo 2, $\alpha=3$ , error promedio, 12-14 abril 2017, con todos los valores de rugosidad. ....	96
Figura 3.79: Función objetivo 1 vs función objetivo 2, $\alpha=3$ , error promedio, 12-14 abril 2017, valores de interés. ....	96
Figura 3.80: Función objetivo 1 vs función objetivo 2, $\alpha=4$ , error promedio, 12-14 abril 2017, con todos los valores de rugosidad. ....	97
Figura 3.81: Función objetivo 1 vs función objetivo 2, $\alpha=4$ , error promedio, 12-14 abril 2017, valores de interés. ....	97
Figura 3.82: Función Objetivo vs n de Manning, $\alpha=1, 2, 3$ y 4, error cuadrático, 12- 14 abril 2017. ....	99
Figura 3.83: Función objetivo 1 vs función objetivo 2, $\alpha=1$ , error cuadrático, 12-14 abril 2017, con todos los valores de rugosidad. ....	99
Figura 3.84: Función objetivo 1 vs función objetivo 2, $\alpha=1$ , error cuadrático, 12-14 abril 2017, valores de interés. ....	100
Figura 3.85: Función objetivo 1 vs función objetivo 2, $\alpha=2$ , error cuadrático, 12-14 abril 2017, con todos los valores de rugosidad. ....	100
Figura 3.86: Función objetivo 1 vs función objetivo 2, $\alpha=2$ , error cuadrático, 12-14 abril 2017, valores de interés. ....	101
Figura 3.87: Función objetivo 1 vs función objetivo 2, $\alpha=3$ , error cuadrático, 12-14 abril 2017, con todos los valores de rugosidad. ....	101
Figura 3.88: Función objetivo 1 vs función objetivo 2, $\alpha=3$ , error cuadrático, 12-14 abril 2017, valores de interés. ....	102
Figura 3.89: Función objetivo 1 vs función objetivo 2, $\alpha=4$ , error cuadrático, 12-14 abril 2017, con todos los valores de rugosidad. ....	102
Figura 3.90: Función objetivo 1 vs función objetivo 2, $\alpha=4$ , error cuadrático, 12-14 abril 2017, valores de interés. ....	103
Figura 3.91: Función Objetivo vs n de Manning, $\alpha=1, 2, 3$ y 4, error promedio, 12-14 abril 2017. ....	105
Figura 3.92: Función objetivo 1 vs función objetivo 2, $\alpha=1$ , error promedio, 12-14 abril 2017, con todos los valores de rugosidad. ....	106
Figura 3.93: Función objetivo 1 vs función objetivo 2, $\alpha=1$ , error promedio, 12-14 abril 2017, valores de interés. ....	106

Figura 3.94: Función objetivo 1 vs función objetivo 2, $\alpha=2$ , error promedio, 12-14 abril 2017, con todos los valores de rugosidad. ....	107
Figura 3.95: Función objetivo 1 vs función objetivo 2, $\alpha=2$ , error promedio, 12-14 abril 2017, valores de interés. ....	107
Figura 3.96: Función objetivo 1 vs función objetivo 2, $\alpha=3$ , error promedio, 12-14 abril 2017, con todos los valores de rugosidad. ....	108
Figura 3.97: Función objetivo 1 vs función objetivo 2, $\alpha=3$ , error promedio, 12-14 abril 2017, valores de interés. ....	108
Figura 3.98: Función objetivo 1 vs función objetivo 2, $\alpha=4$ , error promedio, 12-14 abril 2017, con todos los valores de rugosidad. ....	109
Figura 3.99: Función objetivo 1 vs función objetivo 2, $\alpha=4$ , error promedio, 12-14 abril 2017, valores de interés. ....	109
Figura 3.100: Función Objetivo vs n de Manning, $\alpha=1, 2, 3$ y 4, error cuadrático, 12- 14 ABR 2017. ....	111
Figura 3.101: Función objetivo 1 vs función objetivo 2, $\alpha=1$ , error cuadrático, 12-14 abril 2017, con todos los valores de rugosidad. ....	111
Figura 3.102: Función objetivo 1 vs función objetivo 2, $\alpha=1$ , error cuadrático, 12-14 abril 2017, valores de interés. ....	112
Figura 3.103: Función objetivo 1 vs función objetivo 2, $\alpha=2$ , error cuadrático, 12-14 abril 2017, con todos los valores de rugosidad. ....	112
Figura 3.104: Función objetivo 1 vs función objetivo 2, $\alpha=2$ , error cuadrático, 12-14 abril 2017, valores de interés. ....	113
Figura 3.105: Función objetivo 1 vs función objetivo 2, $\alpha=3$ , error cuadrático, 12-14 abril 2017, con todos los valores de rugosidad. ....	113
Figura 3.106: Función objetivo 1 vs función objetivo 2, $\alpha=3$ , error cuadrático, 12-14 abril 2017, valores de interés. ....	114
Figura 3.107: Función objetivo 1 vs función objetivo 2, $\alpha=4$ , error cuadrático, 12-14 abril 2017, con todos los valores de rugosidad. ....	114
Figura 3.108: Función objetivo 1 vs función objetivo 2, $\alpha=4$ , error cuadrático, 12-14 abril2017, valores de interés. ....	115

**ÍNDICE DE ANEXOS**

Anexo 1: Anexo digital, tablas en el software Excel “Análisis de sensibilidad de la calibración del modelo hidráulico en régimen impermanente ante la variación de la n de Manning inicial” .....	123
Anexo 2: Anexo digital, tablas en el software Excel “Frentes de Pareto 9_12MAR2017” .....	123
Anexo 3: Anexo digital, tablas en el software Excel “Frentes de Pareto 12_14ABR2017” .....	123
Anexo 4: Anexo digital, documento en el software Word “Guía para calibrar el modelo hidráulico en régimen impermanente” .....	123

María Gabriela Pérez Jaramillo

Trabajo de Graduación

Ing. Carlos Javier Fernández de Córdova Webster, M. Sc.

Abril 2019

**FRENTE DE PARETO DE LA CALIBRACIÓN EN RÉGIMEN  
IMPERMANENTE DE UN MODELO HIDRÁULICO DEL RÍO YANUNCAY,  
DE LA CIUDAD DE CUENCA.**

**INTRODUCCIÓN**

A lo largo de los años los ingenieros civiles han tenido que dar solución a problemas tanto simples como complejos mediante el desarrollo e innovación de nuevos métodos o técnicas satisfaciendo las necesidades que presente la población, ya sean viales, estructurales, hidráulicas, etc.

Para los problemas de Ingeniería Hidráulica se han desarrollado procedimientos para su solución como son los modelos hidráulicos, los cuales se utilizan para representar de una manera simplificada ciertos eventos de la naturaleza con el fin de predecir la conducta que puede llegar a tener un fenómeno natural como las inundaciones en ríos ante lluvias intensas.

Los modelos hidrodinámicos se clasifican en: unidimensional (1D), cuasi 2D, bidimensional (2D) y tridimensional (3D), que se explican a continuación.

Los modelos unidimensionales (1D) consideran el río como una línea, con una serie de puntos de cálculo que son las secciones transversales, siendo la geometría una propiedad de cada punto de cálculo. Las hipótesis que más influyen los resultados, son: el flujo de agua en sentido del eje del río, la cota y velocidad de agua son constantes en cada sección, para la velocidad existen correcciones que se basan en parametrizaciones teóricas de la distribución de velocidad en una sección transversal. Uno de los problemas que presenta este modelo es cuando existen llanuras de inundación importantes y el cauce principal tiene cierta curvatura ya que en este caso es complicado definir las secciones por lo que dificulta que se cumpla la primera hipótesis del flujo de agua. Siendo aún más crítico el hecho de que la velocidad del agua es muy variable dentro de cada sección por lo que algunas veces se incluyen parámetros para considerar de forma aproximada estos efectos.

Estos modelos aportan una considerable facilidad en cuanto a la creación y ejecución del modelo cuando se compara con otras opciones sobre todo en régimen permanente (Bladé et al., 2014).

Los modelos cuasi-2D incorporan la llanura de inundación para considerar estas áreas como una serie de celdas o depósitos conectados entre sí. Los mismos se calculan mediante ecuaciones simplificadas que resulta efectiva cuando la misma no requiere el detalle del campo de velocidades, siendo el único objetivo conocer los niveles de la lámina de agua (Bladé et al., 2014).

Los modelos bidimensionales (2D) consideran el río como una malla formada por una serie de celdas poligonales que representan la topografía del cauce y llanuras de inundación. Dicha malla puede ser regular o irregular, estructurada o no, formada por triángulos o cuadriláteros. La mejor representación de la geometría y contornos se consigue con una malla irregular. Muchas de las veces, es útil la combinación de modelos 1D y 2D para aprovechar las ventajas de cada uno de ellos, pero requieren de un trabajo laborioso para conectarlos. Para la modelización en dos dimensiones se requiere de mayor trabajo y tiempo ya que es necesario una buena malla de cálculo para el caso de estudio (Bladé et al., 2014).

Los modelos tridimensionales (3D) son los menos comunes, debido a que hacen uso de mallas de cálculo de varios millones de elementos, con un costo computacional muy alto, se restringe al estudio en torno a estructuras hidráulicas como pilas de puentes, vertederos o compuertas. Este modelo utiliza distintos tipos de discretización espacial como una malla tridimensional fija estructurada o no y de esta manera definir la posición de lámina a partir de una variable definida en cada elemento de la malla. Tiene la ventaja de captar formas de las láminas de agua muy complejas y el problema es que es necesario hacer uso de mallas finas para definir la posición de la lámina de agua, lo cual incrementa el número de elementos de la malla y el tiempo de cálculo. Otra manera de realizar este modelo es la discretización vertical que consiste en una malla 2D horizontal a partir de la cual se generan un número de capas en la dirección vertical, teniendo como ventaja determinar la forma precisa de la lámina de agua con un número pequeño de capas (Bladé et al., 2014).

Para cada una de las clasificaciones de los modelos hidráulicos existen varios programas que permiten realizar cada uno de ellos. Antes de que el programa HEC-RAS incorporara la opción del régimen variable, el más utilizado fue Mike-11 del *Danish Hydraulic Institute* para los modelos unidimensionales. Para los modelos bidimensionales los pioneros fueron Mike-21, Sobek e Iber siendo el último el más importante. Por último, para modelos tridimensionales está Telemac desarrollado por *Laboratoire National d'Hydraulique*, así como el modelo Delf3D y Flow3D (Bladé et al., 2014).

En el presente trabajo se hace uso del software HEC-RAS en su versión 5.0.3 (*Hydrological Engineering Center – River Analysis System*) desarrollado por el *Hydrologic Engineering Center* del *US Army Corps of Engineers*, el cual se encarga de la modelización hidráulica con 4 tipos de análisis: régimen permanente unidimensional, no permanente unidimensional y bidimensional, transporte de sedimentos y análisis de calidad de agua (Benayas, 2014). A partir de un modelo unidimensional del río Yanuncay, se procederá a calibrarlo en régimen impermanente mediante la variación del coeficiente de Manning, generando distintos comportamientos que serán analizados para obtener cual es el que más se asemeja al comportamiento real del río, es decir, se compararán los niveles simulados con los observados en el mismo.

Para determinar el valor de la  $n$  de Manning, que hace que el resultado de la modelación hidráulica esté lo más cerca de la realidad, se utilizan varias técnicas estadísticas muy conocidas, y el criterio del Frente de Pareto aplicado de manera novedosa en la simulación hidráulica de ríos.

Con el modelo calibrado se puede encontrar las alturas que el río puede alcanzar ante distintos eventos de lluvia-escorrentía, resultados que pueden ser utilizados para crear un sistema de alerta temprana ante inundaciones.

## **ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN**

En la ciudad de Cuenca, ubicada en el Ecuador, no se cuenta con un sistema de alerta temprana ante inundaciones, lo que representa un problema, considerando que la misma se encuentra atravesada por cuatro ríos: Tomebamba, Yanuncay, Machángara y Tarqui. Cada uno de ellos responde de manera diferente a las precipitaciones, generando inconvenientes como desbordamientos y erosión en las orillas por el aumento de caudal.

La investigación se desarrollará en la cuenca del río Yanuncay por ser una de las que mayores problemas de inundaciones ha causado en la ciudad, además se encuentra bien monitoreada y cuenta con buena información hidrometeorológica.

Este proyecto se centra en la calibración de un modelo hidráulico que permita predecir los posibles aumentos de nivel que puede alcanzar el río, siendo el problema principal encontrar rugosidad inicial correcta que haga que el comportamiento del modelo sea lo más semejante al funcionamiento real del río.

## **OBJETIVOS**

### **Objetivo general**

Obtener el frente de pareto del coeficiente de rugosidad inicial ( $n$  de Manning) para la calibración en régimen impermanente de un modelo hidráulico del río Yanuncay.

### **Objetivos específicos**

- Generar varios escenarios de simulación del modelo hidráulico del río Yanuncay con el programa HEC-RAS, variando el coeficiente de rugosidad inicial ( $n$  de Manning).
- Comparar los resultados de la calibración del modelo hidráulico variando el método de evaluación de errores entre el promedio aritmético y el valor medio cuadrático.
- Obtener los valores de los coeficientes de Smirnov-Kolmogorov y Nash-Sutcliffe para los diferentes escenarios de simulación hidráulica.
- Determinar el coeficiente de rugosidad inicial con el que se obtienen los mejores resultados de la calibración del modelo hidráulico.

## CAPÍTULO I

### ESTADO DEL ARTE Y MARCO TEÓRICO

#### 1.1. Estado del arte

A lo largo de la historia la ingeniería ha tenido que dar soluciones factibles, definiendo técnicas o métodos que permitan mejorar la calidad de vida de las personas.

Muchas de las veces se presentan soluciones sencillas tanto técnica como económicamente, pero en casos como los fenómenos naturales, como el que se aborda en este trabajo que consiste en obtener el valor inicial del coeficiente de rugosidad inicial de Manning para calibrar un modelo hidráulico en régimen impermanente, la solución al problema es más compleja.

Siendo la hidráulica el campo en donde más se ha desarrollado la modelación, “existen evidencias de estudios de diseños hidráulicos realizados desde tiempos antiguos, mediante pequeñas representaciones de estructuras y máquinas, por los cuales se ha llegado a enunciar principios fundamentales en la hidráulica...” (Herrera P, 2004).

De la investigación realizada en diversos países sobre la calibración de modelos hidráulicos se destacan los siguientes:

- El del río Bogotá, en el cual se realizó una modelación para la emisión de pronósticos hidrológicos de inundaciones en tiempo real, se hace uso del software HEC-RAS para la modelación del flujo permanente que a su vez crea las zonas de inundación para cada perfil generando un archivo de exportación y se hace uso de la extensión HEC-GeoRAS, el cual genera los resultados finales en donde se visualiza la mancha de agua, grids de profundidad, siendo posible determinar los límites de áreas de inundación y calcular las mismas. Para simular el modelo se hacen uso de herramientas que corresponden a ecuaciones diferenciales determinísticas a través, de ecuaciones diferenciales lineales y ordinarias, en las cuales el parámetro de incertidumbre es  $\gamma$  que varía entre -1 y 1, el mismo que se obtiene después de la calibración.

Mediante este proceso se analiza el comportamiento del modelo en el cual se hicieron uso de datos históricos de manera que al variar los parámetros se obtenga la mayor concordancia entre los valores observados y los simulados, después de obtener estos valores se obtiene el porcentaje de error de manera que el menor sea el seleccionado (Torres & González, 2010).

- En el trabajo de Coppola (2016) para el estudio del río Basento en Italia, hace uso del software HEC-RAS y ARC-GIS, en donde la geometrización creada en el SIG sirve para dar al programa toda la información necesaria sobre las características del río, con las cuales se efectúan los cálculos para la simulación. HEC-RAS calcula, sobre la base de las características de varios tramos, la distribución de agua correspondiente a los nudos, explotando las ecuaciones de conservación de energía con un proceso interactivo después de una primera división para proveer los datos de inicio (Coppola, 2016).
- En Santa Clara, capital de la provincia de Villa Clara en Cuba, para realizar la modelación hidráulica se hizo uso de los programas ArcGIS y HEC-RAS, mediante el siguiente procedimiento; primeramente mediante el software ArcGIS se define el área de estudio, de manera que se delimita la posible zona de inundación, las secciones transversales y se exportan los resultados al programa HEC-RAS, en el cual se ingresan los valores de la  $n$  de Manning, así como el caudal del río y nuevamente se exporta a ArcGIS en donde se seleccionan los perfiles donde se va a observar la simulación (López, 2017).
- En la ciudad de Cartago, Costa Rica se realizó la “Modelación hidráulica para el análisis y propuesta de obras de mitigación de inundaciones en finca valle la estrella” en donde debido a que las simulaciones para flujo permanente 1D no tienen en cuenta todos los efectos hidrodinámicos hicieron uso del software HEC-RAS ya que incluye para el cálculo el flujo no permanente, que realiza el cálculo de perfiles mediante diferencias finitas solucionado iterativamente, siendo el principal parámetro del modelo el coeficiente de rugosidad  $n$  de Manning el cual es calibrado manualmente en el programa, a partir de la comparación de niveles de agua observados y simulados. A su vez hacen uso también de su extensión HEC-GeoRAS para elaborar mapas de las elevaciones del nivel de agua (Segura S & Casasola R, 2011).

Como se puede ver la modelación es de suma importancia alrededor del mundo por la complejidad de representar los eventos naturales como es el comportamiento de ríos, por lo que en este trabajo se propone la calibración del modelo hidráulico en régimen impermanente del río Yanuncay mediante la herramienta HEC-RAS siendo el parámetro de incertidumbre la rugosidad inicial que genera un comportamiento del modelo semejante al real del río.

A continuación, se mencionan algunos trabajos realizados en los que hacen uso de soluciones multiobjetivo:

- En México se realizó el “Diseño de sistemas hidráulicos bajo criterios de optimización de puntos de pliegue y múltiples criterios”, dicho trabajo busca diseñar un sistema de reúso de agua tratada, en donde se minimice el caudal y costo de infraestructura, en el cual se emplea primeramente una programación matemática que posteriormente se comparan con la técnica de solución de procesos de decisión de la cual se obtiene un conjunto de Pareto (Mariano & Alcocer, 2005).
- En la ciudad de Valencia (España), se efectuó el “Diseño multiobjetivo de un sistema de abastecimiento de agua incluyendo la cosecha de agua de lluvia como recurso complementario”, el cual hace uso del programa EPANET y de su Toolkit sobre Visual Basic, siendo desarrollado un programa que permita utilizar los Algoritmos genéticos para la optimización de la función objetivo propuesta y los cálculos requeridos para obtener las soluciones que constituirán el frente de Pareto. El modelo es de optimización por los beneficios al reducir los diámetros de las tuberías de abastecimiento, así como las disminuciones de la producción de agua potable por lo que se conseguirá una optimización multiobjetivo en la cual se obtendrá un frente de Pareto que muestre el costo de cada alternativa de abastecimiento que permitirá tomar decisiones apropiadas según los recursos económicos (Luque, 2013).

Este trabajo servirá para calibrar adecuadamente el modelo hidráulico del río Yanuncay con la finalidad de obtener los mapas de inundación para proponer un sistema de alerta temprana ante inundaciones, el cual es de suma importancia para la ciudad de Cuenca, ya que permitirá generar alertas sobre este fenómeno.

## 1.2. Marco teórico

Para que un modelo pueda ser utilizado con confianza debe ser previamente calibrado. A continuación, se presenta la terminología y conceptos para el correcto entendimiento del proceso en el presente trabajo.

### 1.2.1. Modelación

“El modelo es un instrumento de la investigación de carácter material o teórico, creado para reproducir el objeto que se está estudiando. Constituye una reproducción simplificada de la realidad que permite descubrir nuevas relaciones y cualidades del objeto de estudio. Es un instrumento de trabajo que supone una aproximación a la realidad. De hecho, el modelo constituye un eslabón intermedio entre el sujeto (investigador) y el objeto de investigación.” (Pérez et al., 1996, págs. 142-143).

### 1.2.2. Modelo hidráulico

“Un modelo hidráulico es la construcción digital (virtual) de una red de distribución de agua, que permite reproducir y prever el comportamiento de la misma, para poder realizar pruebas y definir soluciones. La utilidad práctica de un software hidráulico reside en que permite hacer pruebas; esto sin grandes inversiones de dinero.” (Programa de Agua Potable y Alcantarillado, 2012, pág. 2).

“La modelación del funcionamiento de la una red trata de describir el comportamiento hidráulico de los diferentes componentes de la misma, es decir, trata de reproducir lo que sucede en la realidad en la red con la ayuda de un modelo matemático hidráulico.” (Luque, 2013, pág. 50).

La hidráulica de ríos es la disciplina o conjunto de ellas que se encargan del estudio de procesos de erosión de suelo, gestión de recursos naturales, evaluación de transporte de sedimentos y sedimentación en reservorios, así como también a las modificaciones y alteraciones que ocurren en el dominio de toda la cuenca (Centro de Estudios de Hidrosistemas, 2013).

La modelación hidráulica de ríos surge como una necesidad para garantizar el manejo y gestión del espacio fluvial de manera que se logre prever su comportamiento futuro, la misma puede resolverse mediante modelos 1D que son los menos complicados, sin embargo, sus resultados no son tan precisos, también existen modelos 2D que son bastante utilizados actualmente por su precisión, por último, los más precisos son los modelos 3D, sin embargo, tienen un costo computacional muy elevado.

### 1.2.3. Coeficiente de Rugosidad

El coeficiente de rugosidad es un parámetro muy variable que depende de una cantidad de factores como la vegetación, irregularidades de las secciones transversales, sedimentación y erosión, obstrucción, una forma de representar la rugosidad de la superficie es a través de la  $n$  de Manning. Estudios realizados sobre este factor, determinan que cuando el material del perímetro es fino, el valor de  $n$  es bajo, y cuando el material es grueso, se obtiene un valor alto de  $n$  (Chow, 1994). El mismo que se determina mediante muestreo del material que conforma el río a las cuales se aplican pruebas de laboratorio para obtener sus características (Vivas, 2004).

En el trabajo de Fernández de Córdoba et al. (2018) se presentan los principales métodos para el cálculo de la  $n$  de Manning como: método de Cowan, método del servicio de conservación de suelos de Estados Unidos, método de la medición de la velocidad, fórmulas empíricas y el método basado en fotografías.

### 1.2.4. Régimen permanente

Cuando las propiedades del fluido y las condiciones del movimiento en cualquier punto no cambian con el tiempo (Universidad Politécnica de Madrid, 2016).

También se entiende por flujo permanente como aquel que en una sección determinada no presenta cambios en sus características hidráulicas con respecto al tiempo, es decir, que el caudal, presión, velocidad, etc. son constantes a lo largo del tiempo (Rocha F, 2012). Este flujo es difícil de encontrar en la naturaleza.

### 1.2.5. Régimen impermanente

Cuando las propiedades del fluido y las condiciones del movimiento en cualquier punto cambian con el tiempo (Universidad Politécnica de Madrid, 2016).

El flujo impermanente se refiere a los cambios en las condiciones hidráulicas a lo largo del tiempo, es decir que el nivel de la superficie es variable por lo que el caudal, presión, velocidad, etc. varían con el tiempo. Siendo el más común en la naturaleza (Rocha F, 2012).

#### 1.2.6. Calibración

Consiste en ajustar los parámetros que introducen mayor incertidumbre al modelo, como el coeficiente de rugosidad (Rondán Galán, 2016). La calibración es muy importante si de la confiabilidad del modelo se trata. Un modelo bien calibrado asegura su uso futuro como herramienta de decisión (González C et al., 2013).

También se define como un conjunto de operaciones que establecen, en condiciones específicas, la relación que existe ya sea de magnitud de un instrumento de medida o valores representados por un material de referencia, con los valores correspondientes de esa magnitud realizados por patrones o mediciones (Centro Español de Metrología, 2013).

Los modelos hidráulicos de ríos sirven para conocer las variables de incertidumbre como son: el caudal, velocidad, rugosidad, entre otros, empleando métodos numéricos. Siendo los modelos una aproximación a la realidad, estos pueden ser en régimen permanente e impermanente, algunos de ellos con ecuaciones complejas y otros con simplificaciones de los términos con menor contribución (Espinoza & Vintimilla, 2013).

En el software HEC-RAS es necesario disponer de los siguientes datos: geometría, caudales y condiciones de contorno, el valor que se calibra es el coeficiente de rugosidad.

#### 1.2.7. Frente de Pareto

Es un conjunto de todas las posibilidades de solución, de manera que la elección del modelo óptimo es a posteriori (Martinez et al., 2010).

Es importante conocer la diferencia entre los problemas de optimización de un solo objetivo con respecto a los esquemas multiobjetivo en donde la primera es la inexistencia de una solución óptima global única, y la segunda un conjunto de soluciones óptimas que forman el llamado conjunto de Pareto (Mariano & Alcocer, 2005).

También se define como un vector de variables de decisión que satisface un conjunto de restricciones y optimiza un conjunto de funciones objetivo (Luque, 2013).

#### 1.2.8. Simulación

Simulación es el proceso de diseñar un modelo de un sistema real y llevar a cabo experiencias con él, con la finalidad de aprender el comportamiento del sistema o de evaluar diversas estrategias para el funcionamiento del sistema (Shannon, 1988).

## CAPÍTULO II

### CALIBRACIÓN DEL MODELO HIDRÁULICO DEL RÍO YANUNCAY EN RÉGIMEN IMPERMANENTE Y EVALUACIÓN DEL ERROR

#### 2.1. Creación del modelo hidráulico del río Yanuncay

Como se mencionó en puntos anteriores, el río Yanuncay es uno de los que mayores problemas de inundaciones ha presentado. Analizando la ubicación de las estaciones de medición con las que contaba el río, se elaboró un modelo hidráulico desde la estación en Pucán hasta la intersección con el río Tarqui, que se muestra en la Figura 2.1.

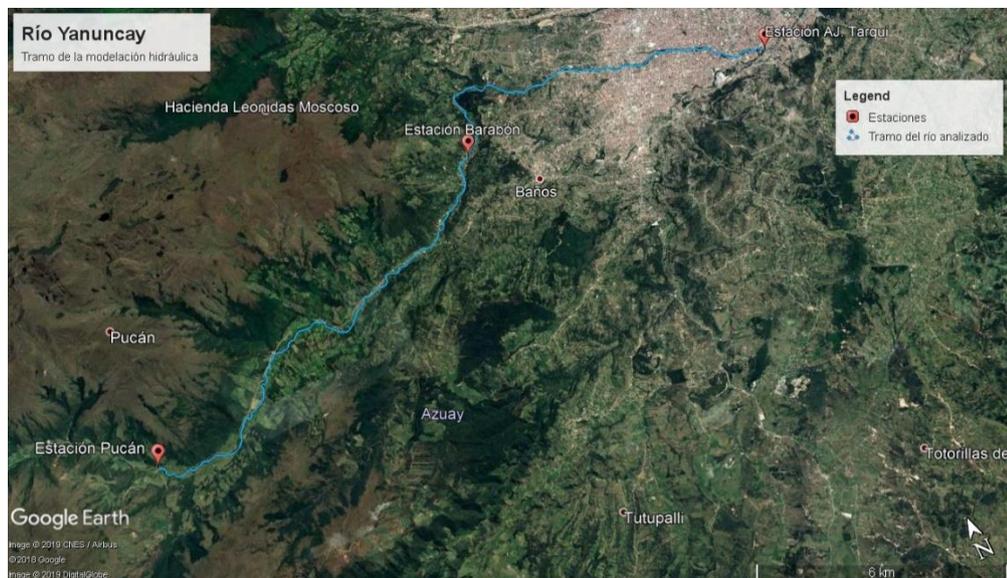


Figura 2.1. Tramo de la modelación hidráulica del río Yanuncay.

Fuente: *Google Earth*.

El modelo se construyó mediante dos herramientas informáticas, ArcGIS v10.5 y HEC-GeoRAS, siendo esta última una extensión que vincula el software HEC-RAS con el GIS.

Para hacer uso de estos programas, es necesario contar con el modelo digital del terreno, el mismo que será la base para la creación del modelo hidráulico. Primero, se empleó el modelo del terreno generado por SIGTIERRAS, posteriormente con el fin de mejorar el detalle del cauce principal, se utilizaron datos de campo de las secciones transversales desde la unión con el río Minas y el puente de la Av. de las Américas (Timbe, 2011) y un levantamiento topográfico realizado por ETAPA EP desde la Av. de las Américas hasta su unión con el río Tarqui.

Contando con la geometría del modelo hidráulico, en el software HEC-RAS se editaron las secciones para eliminar los errores existentes en el modelo digital del terreno.

El modelo construido se corrió en régimen variado impermanente, lo que permitió obtener información valiosa para el sistema de alerta temprana, por lo que se realizaron algunas simulaciones para ajustar los parámetros del modelo y lograr calibrarlo.

## **2.2. Calibración del modelo hidráulico en régimen impermanente empleando el software HEC-RAS**

La calibración es un procedimiento muy importante en la modelación hidráulica, ya que la misma le da mayor confiabilidad al modelo y asegura que los resultados de la simulación sean lo más semejantes a lo que ocurre en realidad. El parámetro de mayor incertidumbre del modelo es el coeficiente de resistencia al flujo que se representa por la  $n$  de Manning. Para este procedimiento se hacen uso del nivel de agua medido por estaciones hidrométricas de Pucán, Barabón y AJ Tarqui, los cuales son comparados con los datos obtenidos del modelo (Fernández de Córdova & Rodríguez, 2016).

El software HEC-RAS tiene la posibilidad de calibrar automáticamente el coeficiente de rugosidad en régimen impermanente, el cual requiere los datos observados del nivel del agua en el río.

Para dicha calibración es necesario las condiciones de frontera, hidrograma de niveles o caudales aguas arriba del modelo, datos observados del nivel en la sección aguas arriba del tramo a calibrar, y un valor inicial del coeficiente de rugosidad de Manning tanto para el cauce como para las llanuras.

A continuación, se muestran las rugosidades iniciales con las que se calibró el modelo en el tramo analizado:

- Tramo Pucán – Barabón:

Cauce principal=0.08

Llanuras=0.1

- Tramo Barabón – AJ. Tarqui:

Cauce principal= 0.04, 0.05, 0.06, 0.065, 0.07, 0.075, 0.0775, 0.08, 0.0825, 0.085, 0.09, 0.10, 0.11

Llanuras=0.1

Estas rugosidades han sido tomadas en base a trabajos anteriores realizados en la cuenca en los que se realizó la estimación del coeficiente de rugosidad por varios métodos (Fernández de Córdova et al. 2016, Fernández de Córdova et al. 2018a, Fernández de Córdova et al. 2018b, Fernández de Córdova et al. 2018c).

En el el anexo 4: se presenta una Guía para calibrar el modelo hidráulico en régimen impermanente, que contiene los principales pasos a seguir.

En la calibración en régimen impermanente se utiliza un factor de rugosidad, que es un mecanismo que emplea el HEC-RAS para obtener la  $n$  de Manning calibrada multiplicando el factor de rugosidad por la  $n$  de Manning inicial.

Los factores de rugosidad se modifican a medida que se avanza en la calibración, iniciando con un valor de uno, hasta valores que hagan que los resultados obtenidos en la calibración se ajusten de la mejor manera a los datos observados, la diferencia entre los mismos debe ser la menor posible.

El HEC-RAS propone dos métodos para evaluar el error de la calibración: el error promedio y error cuadrático, cuya formulación se indica más adelante (ecuaciones 2.1 y 2.2).

Lo ideal para que los resultados sean más próximos a la realidad, sería calibrar el modelo en régimen impermanente con un mayor número de subtramos, sin embargo, esto generaría costos elevados ya que serían necesarias un mayor número de estaciones hidrométricas.

El modelo del río Yanuncay que tiene una longitud de 25 kilómetros, para la calibración se dividió en tres subtramos como se muestra en la Figura 2.2, apoyándose en la información de tres estaciones hidrológicas de la empresa ETAPA EP (Fernández de Córdova et al., 2016).

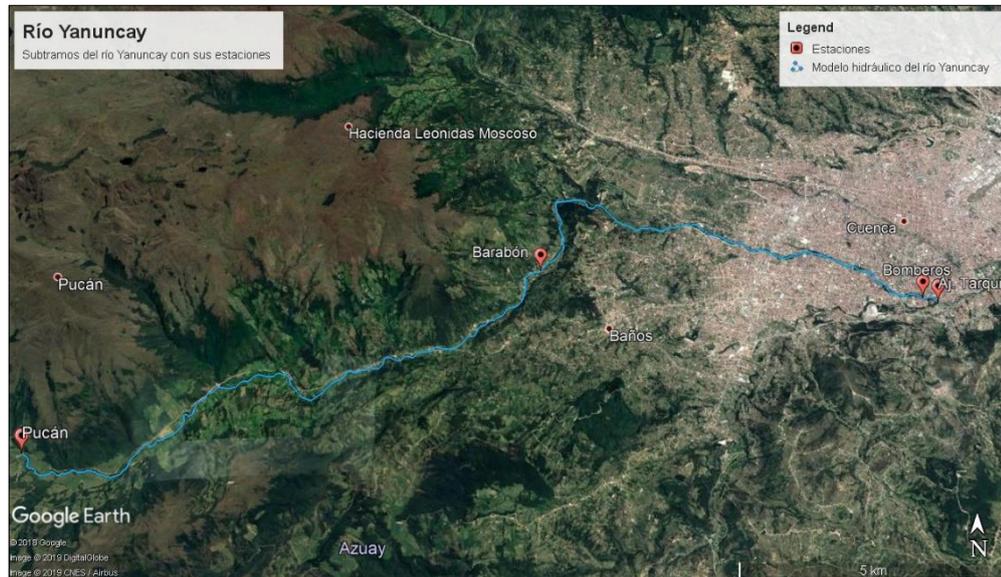


Figura 2.2. Modelo del río Yanuncay con sus subtramos.

Fuente: *Google Earth*.

Se presenta a continuación, una tabla con los eventos, tramos y caudal máximo, que se van analizar en el presente trabajo:

Tabla 2.1. Eventos que se van a correr en el modelo.

Evento		Tramo Barabón - Aj. Tarqui
Inicio	Fin	Q <sub>máx</sub> (m <sup>3</sup> /s)
09/Marzo/2017	12/Marzo/2017	109.88
12/Abril/2017	14/Abril/2017	102.39

Fuente: Autora.

Los comportamientos con cada uno de los eventos se encuentran en los anexos 2: Frentes de Pareto 9\_12MAR2017 y 3: Frentes de Pareto 12\_14ABR2017, que permiten observar como varía el modelo con cada rugosidad inicial para cada evento, como se muestra en la Figura 2.3.

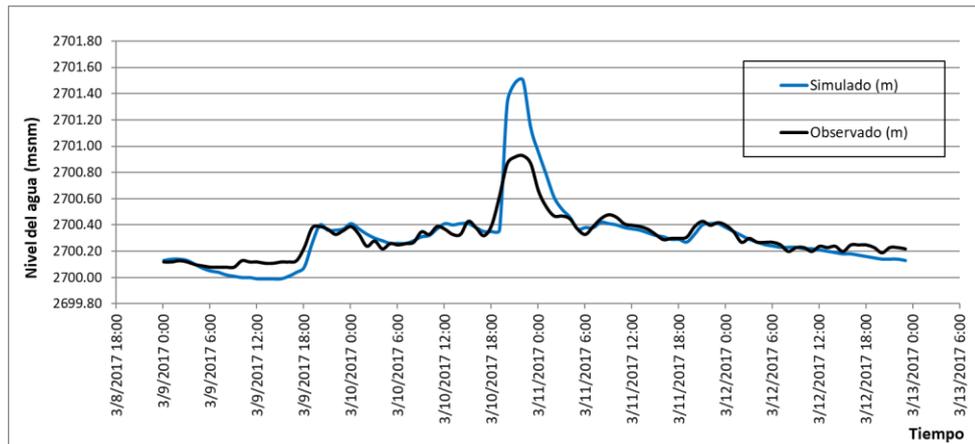


Figura 2.3. Niveles de agua en el río valores observados y simulados.

Fuente: Autora.

Considerando que el objetivo final del modelo hidráulico es el pronóstico de inundaciones, los frentes de Pareto permitirán determinar la  $n$  de Manning inicial que minimiza el error en la parte de la curva donde los valores simulados son menores a los observados, sin exagerar en la estimación de valores por encima de los observados.

### 2.3. Criterios para evaluar el error de la calibración

El error es la diferencia entre el valor verdadero y el obtenido experimentalmente.

En este trabajo se utiliza el método del error promedio, del error medio cuadrático y algunas pruebas de bondad de ajuste para evaluar que tan bien se ajustan los valores simulados a los observados para cada valor de la  $n$  de Manning inicial.

#### 2.3.1. Error promedio (Average Error)

Es la sumatoria de la diferencia entre los valores calculados y observados de la elevación de la superficie del agua, dividida para el número de puntos (Brunner, 2016) cómo se indica en la expresión a continuación:

$$Average\ Error = \frac{1}{k} \sum_{1}^{k} Calc.\ WS - Obs.\ WS \quad (2.1)$$

### 2.3.2. Error cuadrático (Squared Error)

Es la sumatoria de la diferencia entre los valores calculados y observados de la elevación de la superficie del agua elevados al cuadrado, dividida para el número de puntos y se saca la raíz cuadrada (Brunner, 2016) cómo se indica en la expresión a continuación:

$$Squared\ Error = \sqrt{\frac{1}{k} \sum_{1}^k (Calc.\ WS - Obs.\ WS)^2} \quad (2.2)$$

### 2.3.3. Pruebas de bondad de ajuste de datos

Dichas pruebas también se conocen como pruebas estadísticas, que son de gran utilidad para decidir cuándo un conjunto de datos se ajusta a una distribución dada, que quiere decir que permiten determinar cuándo un modelo teórico será satisfactorio para el caso de estudio (Marquéz F, 2012). A continuación, se presentan algunas de ellas: Smirnov-Kolmogorov, Chi-Cuadrado, Anderson-Darling, Ryan-Joiner, Shapiro-Wilk, entre otros. En esta tesis se utiliza la primera prueba de bondad de ajuste para evaluar el error de la calibración de la n de Manning.

#### 2.3.3.1. Coeficiente Smirnov-Kolmogorov

Es una prueba no paramétrica que determina la bondad de ajuste de dos distribuciones de probabilidad entre sí. Compara la función de distribución acumulada observada de una variable con una distribución teórica determinada (simulacionutp, 2016).

$$D = \max|y_{obs} - y_{sim}| \quad (2.3)$$

#### Evento 9 - 12 marzo 2017

Este valor D se calcula para todas las simulaciones realizadas variando la n de Manning y se comparan entre sí, para determinar la menor, encontrándose las menores con un D entre 0.56 y 0.57 correspondiente a las rugosidades 0.06 a 0.0825, como se muestra en la tabla a continuación.

Tabla 2.2: Coeficiente Smirnov-Kolmogorov, evento 9 – 12 marzo 2017.

ERROR PROMEDIO		ERROR CUADRÁTICO	
n	D	n	D
0.04	0.76	0.04	0.76
0.05	0.57	0.05	0.57
0.06	0.56	0.06	0.56
0.065	0.56	0.065	0.56
0.07	0.56	0.07	0.56
0.075	0.57	0.075	0.57
0.0775	0.57	0.0775	0.57
0.08	0.57	0.08	0.57
0.0825	0.57	0.0825	0.57
0.085	0.58	0.085	0.58
0.09	0.6	0.09	0.6
0.1	0.67	0.1	0.67
0.11	0.73	0.11	0.73

Fuente: Autora.

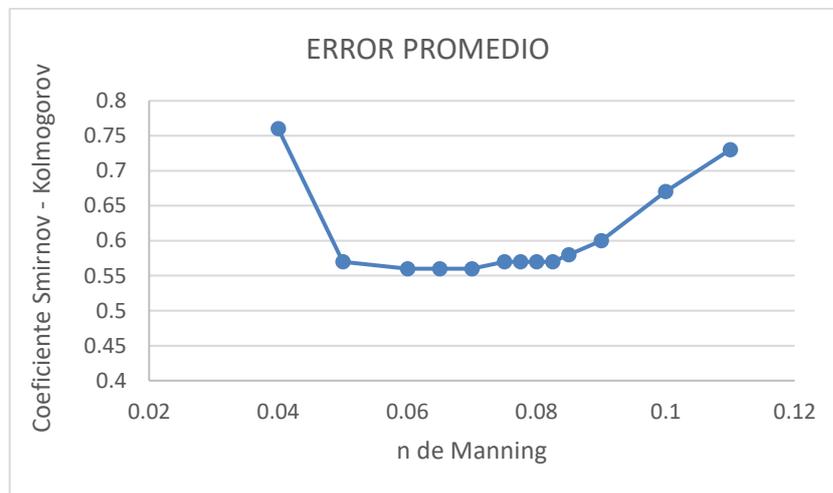


Figura 2.4: n de Manning vs coeficiente Smirnov – Kolmogorov error promedio, evento 9 - 12 marzo 2017.

Fuente: Autora.

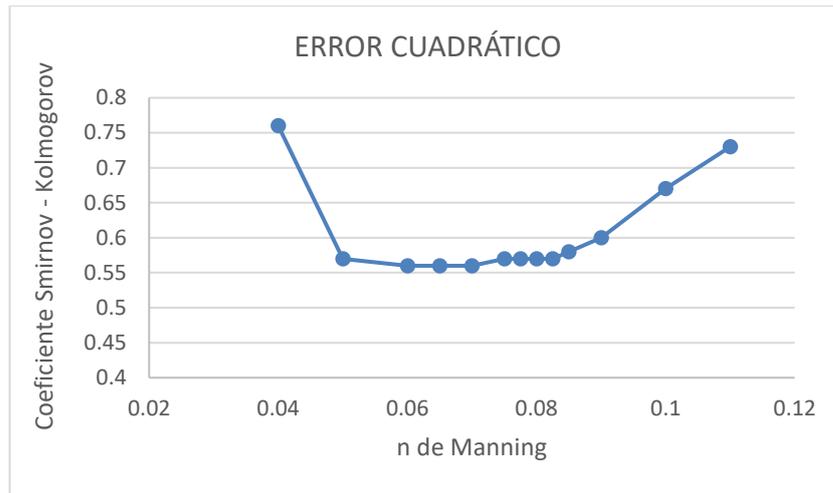


Figura 2.5: n de Manning vs coeficiente Smirnov – Kolmogorov, error cuadrático, evento 9 - 12 marzo 2017.

Fuente: Autora.

En estas dos figuras presentadas, se muestra el comportamiento de la rugosidad inicial frente a los valores obtenidos del coeficiente tanto para el error medio como para el cuadrático, mostrando en su concavidad los menores valores del coeficiente, logrando determinar de una manera gráfica el rango de rugosidades iniciales en el que se encuentran los mismos.

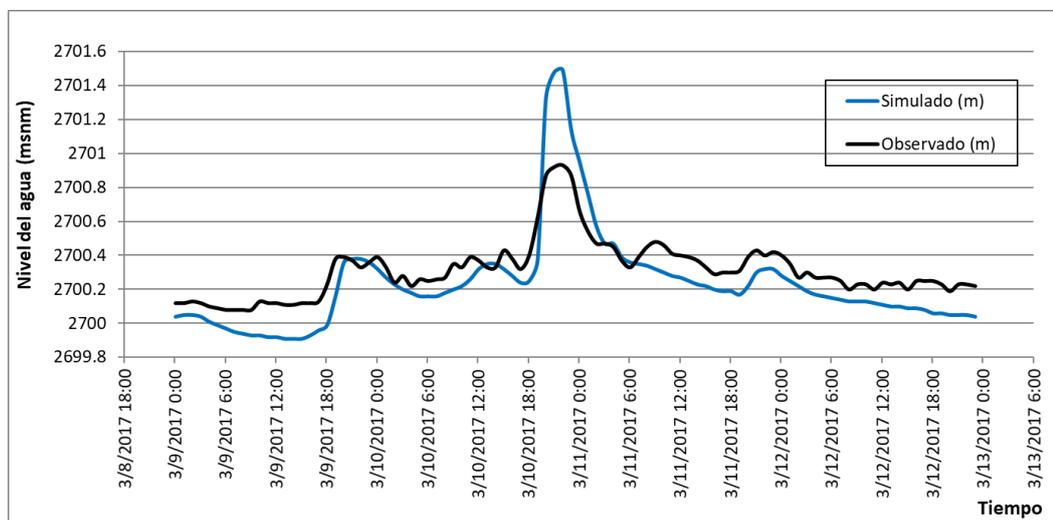


Figura 2.6: Nivel de agua del río, error promedio, n=0.06.

Fuente: Autora.

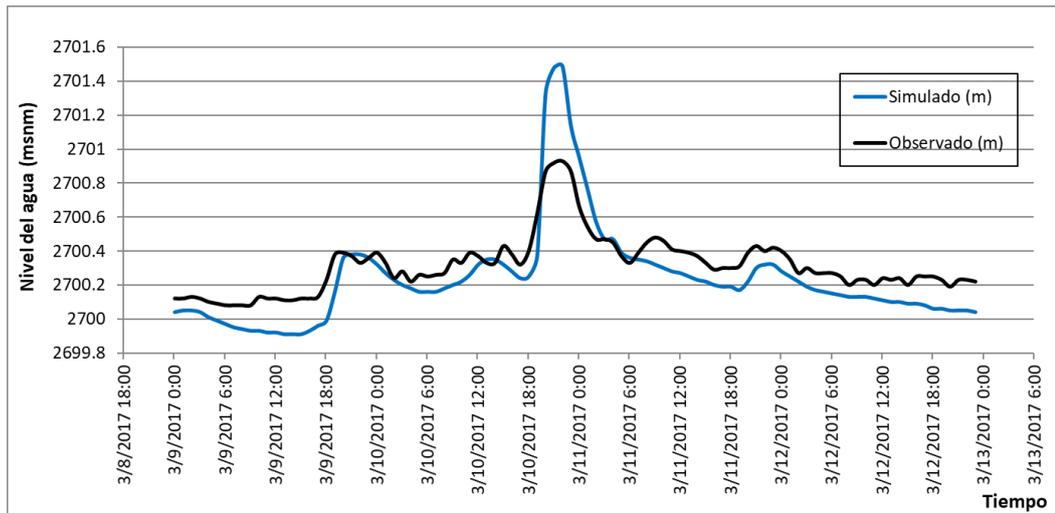


Figura 2.7: Nivel de agua del río, error cuadrático,  $n=0.06$ .

Fuente: Autora.

Estas figuras se realizan a partir de las alturas de agua obtenidas en cada una de las simulaciones realizadas, por lo que se puede observar que el comportamiento real del río está representado por la curva negra, mientras que el comportamiento simulado por la curva azul, lo que se busca es que estos comportamientos sean lo más semejantes posibles.

**Evento 12 - 14 abril 2017**

En este evento los menores valores son D entre 0.62 y 0.63 con el error promedio entre las rugosidades 0.085 a 0.11 y una D entre 0.56 y 0.60 con el error cuadrático corresponde a las rugosidades 0.09 a 0.11, como se muestra en la tabla a continuación.

Tabla 2.3: Coeficiente Smirnov-Kolmogorov, evento 12-14 abril 2017.

ERROR PROMEDIO		ERROR CUADRÁTICO	
n	D	n	D
0.04	0.66	0.04	0.93
0.05	0.85	0.05	0.85
0.06	0.78	0.06	0.78
0.065	0.75	0.065	0.75
0.07	0.72	0.07	0.72
0.075	0.69	0.075	0.69
0.0775	0.67	0.0775	0.67
0.08	0.66	0.08	0.66
0.0825	0.64	0.0825	0.64
0.085	0.63	0.085	0.63
0.09	0.62	0.09	0.60
0.1	0.62	0.1	0.60
0.11	0.62	0.11	0.56

Fuente: Autora.

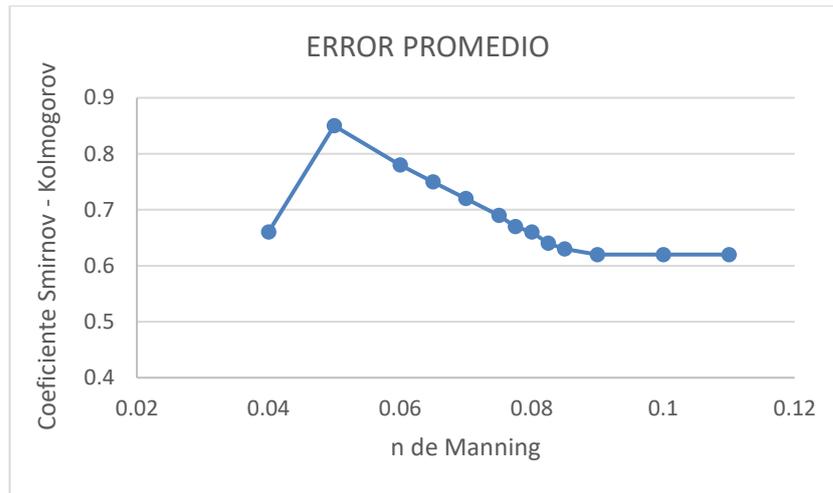


Figura 2.8: n de Manning vs coeficiente Smirnov – Kolmogorov, error promedio, evento 12 - 14 abril 2017.

Fuente: Autora.

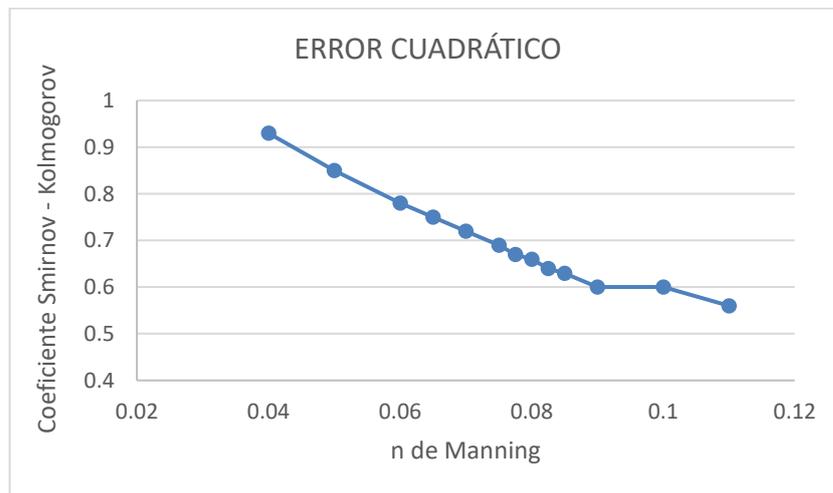


Figura 2.9: n de Manning vs coeficiente Smirnov – Kolmogorov, error cuadrático, evento 12 - 14 abril 2017.

Fuente: Autora.

Dentro de estas figuras se reflejan los valores obtenidos en los cálculos para la obtención del coeficiente, pudiendo observar de una manera gráfica los valores de rugosidad inicial en donde se encuentra la parte más baja de la curva.

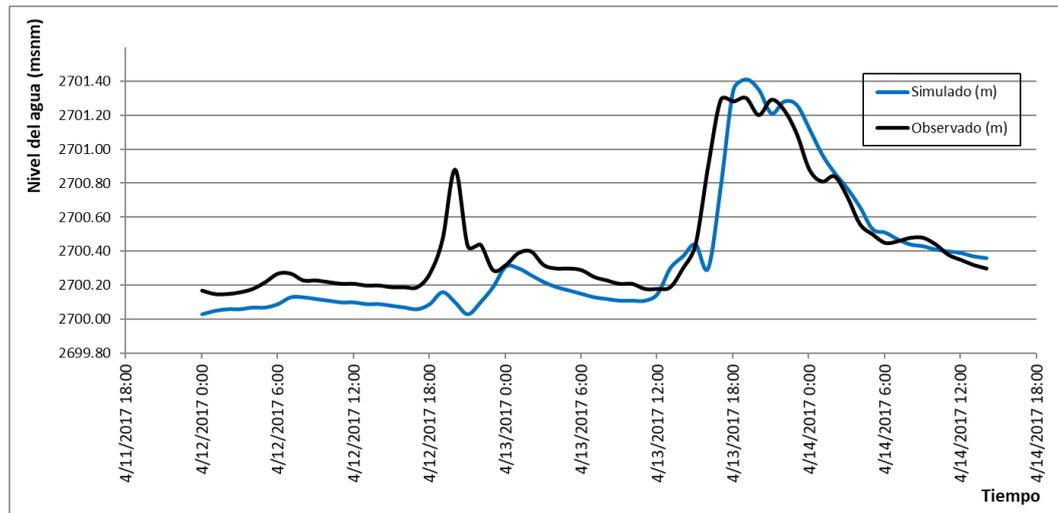


Figura 2.10: Nivel de agua del río, error promedio,  $n=0.06$ .

Fuente: Autora.

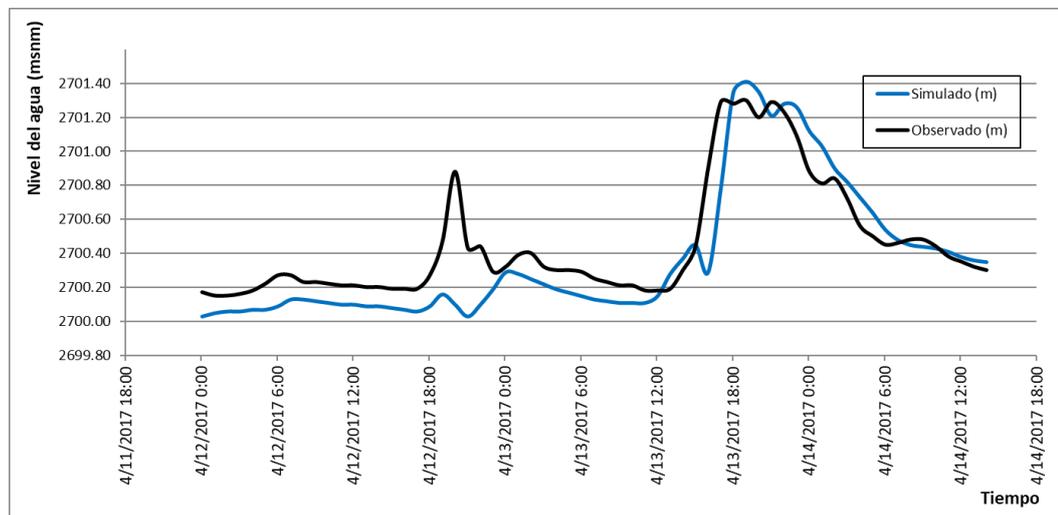


Figura 2.11: Nivel de agua del río, error cuadrático,  $n=0.06$ .

Fuente: Autora.

Como se mencionó anteriormente, estas gráficas se logran mediante los valores obtenidos de las simulaciones, que permiten comparar las alturas de agua tanto las simuladas como las observadas, logrando visualizar sus comportamientos de manera conjunta.

### 2.3.3.2. Coeficiente Nash and Sutcliffe

Es uno de los más usados en Hidrología para medir la dispersión entre series. Si la simulación es perfecta, va a ser igual a 1; los valores negativos indican que el promedio de los datos es un mejor predictor que los resultados simulados. Algunos valores sugeridos para la toma de decisiones son resumidos en la tabla presentada (Cabrera, 2015).

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^k (y_{obs} - y_{sim})^2}{\sum_{i=1}^k (y_{obs} - \overline{y_{obs}})^2} \quad (2.4)$$

Tabla 2.4: Valores referenciales del criterio de Nash-Sutcliffe

<b>E</b>	<b>Ajuste</b>
< 0.2	Insuficiente
0.2 - 0.4	Satisfactorio
0.4 - 0.6	Bueno
0.6 - 0.8	Muy bueno
> 0.8	Excelente

Fuente: (Molnar, 2011)

### Evento 9 - 12 marzo 2017

Dentro de este evento se muestra que el mejor ajuste entre series se encuentra entre las rugosidades 0.07, 0.075, 0.0775, 0.08, 0.0825, 0.085 y 0.09; tanto para el error promedio como para el error cuadrático.

Tabla 2.5: Coeficiente Nash and Sutcliffe, evento 9 - 12 marzo 2017.

ERROR PROMEDIO			ERROR CUADRÁTICO		
n	NSE	Ajuste	n	NSE	Ajuste
0.04	-1.87	Insuficiente	0.04	-1.87	Insuficiente
0.05	-0.52	Insuficiente	0.05	-0.52	Insuficiente
0.06	0.12	Insuficiente	0.06	0.12	Insuficiente
0.065	0.31	Satisfactorio	0.065	0.31	Satisfactorio
0.07	0.44	Bueno	0.07	0.44	Bueno
0.075	0.49	Bueno	0.075	0.49	Bueno
0.0775	0.50	Bueno	0.0775	0.50	Bueno
0.08	0.51	Bueno	0.08	0.51	Bueno
0.0825	0.50	Bueno	0.0825	0.49	Bueno
0.085	0.49	Bueno	0.085	0.48	Bueno
0.09	0.44	Bueno	0.09	0.43	Bueno
0.10	0.28	Satisfactorio	0.10	0.27	Satisfactorio
0.11	0.07	Insuficiente	0.11	0.06	Insuficiente

Fuente: Autora.

**Evento 12 - 14 abril 2017**

Dentro de este evento se muestra que el mejor ajuste entre series para el error promedio se encuentra entre las rugosidades 0.0775, 0.08, 0.0825 y 0.85 y para el error cuadrático prácticamente todas las simulaciones tienen un muy buen ajuste exceptuando las rugosidades de 0.04 y 0.05.

Tabla 2.6: Coeficiente Nash and Sutcliffe, evento 12 – 14 abril 2017.

ERROR PROMEDIO			ERROR CUADRÁTICO		
n	NSE	Ajuste	n	NSE	Ajuste
0.04	0.81	Excelente	0.04	0.23	Satisfactorio
0.05	0.53	Bueno	0.05	0.52	Bueno
0.06	0.68	Muy Bueno	0.06	0.67	Muy Bueno
0.065	0.74	Muy Bueno	0.065	0.73	Muy Bueno
0.07	0.78	Muy Bueno	0.07	0.77	Muy Bueno
0.075	0.80	Muy Bueno	0.075	0.79	Muy Bueno
0.0775	0.80	Excelente	0.0775	0.80	Muy Bueno
0.08	0.81	Excelente	0.08	0.80	Muy Bueno
0.0825	0.81	Excelente	0.0825	0.79	Muy Bueno
0.085	0.80	Excelente	0.085	0.80	Muy Bueno
0.09	0.79	Muy Bueno	0.09	0.78	Muy Bueno
0.10	0.74	Muy Bueno	0.10	0.78	Muy Bueno
0.11	0.68	Muy Bueno	0.11	0.65	Muy Bueno

Fuente: Autora.

## **2.4. Tablas obtenidas con las simulaciones**

### **2.4.1. Evento del 9 – 12 marzo 2017**

Anexo 2: Frentes de Pareto 9\_12MAR2017

### **2.4.2. Evento del 12 – 14 abril 2017**

Anexo 3: Frentes de Pareto 12\_14ABR2017

## CAPÍTULO III

### CONSTRUCCIÓN DE LOS FRENTES DE PARETO

Se van a construir tres frentes de Pareto que cuentan con dos funciones objetivo cada uno de ellos.

Para cada uno de los frentes de Pareto, dentro de la función objetivo número uno cuando los valores observados ( $y_{obs}$ ) son mayores o iguales a los valores simulados ( $y_{sim}$ ) es afectada por un coeficiente ( $\alpha$ ), para darle más peso a la diferencia entre valores observados y simulados. La segunda función objetivo es el máximo error entre los valores observados y los simulados.

Para el cálculo de cada uno de los frentes de Pareto, mediante el programa de HEC-RAS, se varió entre el error promedio y el error cuadrático. A continuación, se presentan las fórmulas utilizadas para cada frente de Pareto, conjuntamente con los cálculos realizados.

#### 3.1. Evento del 9 - 12 marzo 2017

##### 3.1.1. Frente de Pareto 1

Función objetivo 1

$$E_i = \begin{cases} [(y_{obs} - y_{sim})] \times \alpha & \text{para } y_{sim} \leq y_{obs} \\ [(y_{obs} - y_{sim})] & \text{para } y_{sim} > y_{obs} \end{cases}$$

$$FO1 = \Sigma E_i \quad \alpha = 1, 2, 3, 4$$

Función objetivo 2

$$FO2 = MAX(E_i)$$

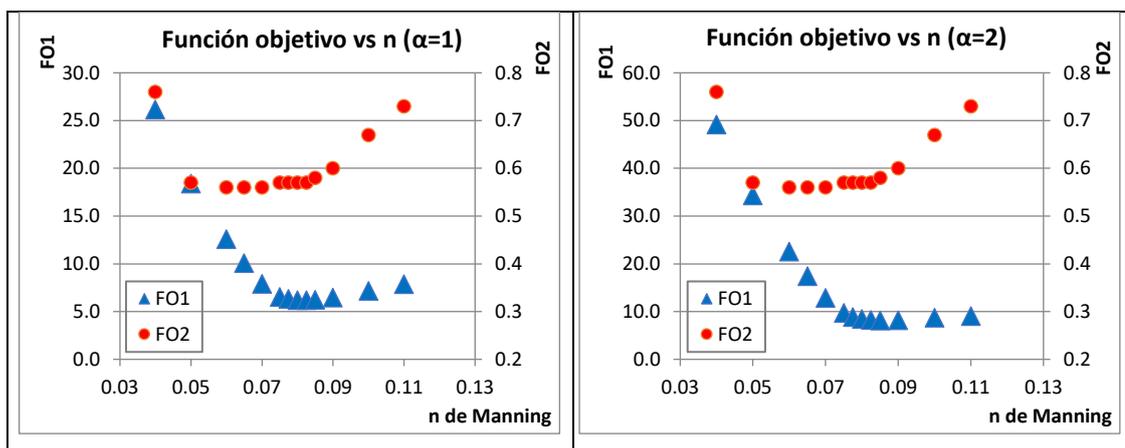
### 3.1.1.1. Error promedio

Tabla 3.1: Resumen frente de Pareto 1, error promedio, 9-12 marzo 2017.

n	FO1 para cada valor de $\alpha$				FO2
	1	2	3	4	
0.04	26.16	49.17	72.18	95.19	0.76
0.05	18.42	34.35	50.28	66.21	0.57
0.06	12.59	22.55	32.51	42.47	0.56
0.065	10.07	17.46	24.85	32.24	0.56
0.07	7.92	12.89	17.86	22.83	0.56
0.075	6.53	9.72	12.91	16.10	0.57
0.0775	6.34	8.90	11.46	14.02	0.57
0.08	6.21	8.50	10.79	13.08	0.57
0.0825	6.20	8.27	10.34	12.41	0.57
0.085	6.23	8.13	10.03	11.93	0.58
0.09	6.46	8.19	9.92	11.65	0.60
0.1	7.18	8.72	10.26	11.80	0.67
0.11	7.87	9.10	10.33	11.56	0.73

Fuente: Autora.

En la tabla presentada se muestra un resumen de los cálculos realizados para el frente de Pareto 1 para cada función objetivo (FO1 y FO2), para la FO1 se agrupan los datos obtenidos con cada factor  $\alpha$ , con estos valores se realizan las gráficas que se muestran a continuación:



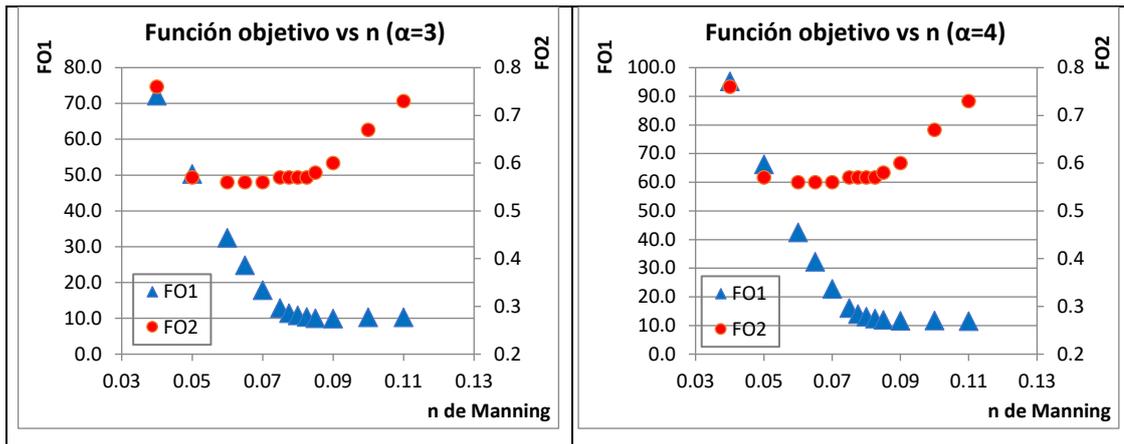


Figura 3.1: Función objetivo vs n de Manning,  $\alpha=1, 2, 3$  y  $4$ , error promedio, 9-12 marzo 2017.

Fuente: Autora.

En las 4 figuras presentadas se compara el comportamiento de cada función objetivo con respecto a cada rugosidad analizada de manera que los puntos donde se encuentra la parte cóncava de la curva será el rango de rugosidad con menor relación entre funciones objetivo.

En este primer análisis se muestra que el rango de rugosidades se encuentra entre 0.07 y 0.11.

En las figuras que se muestran a continuación se busca encontrar la relación entre las funciones objetivo más pequeña, es decir, el punto con menor valor tanto de la función objetivo 1 y 2, que podrán ser uno o más valores.

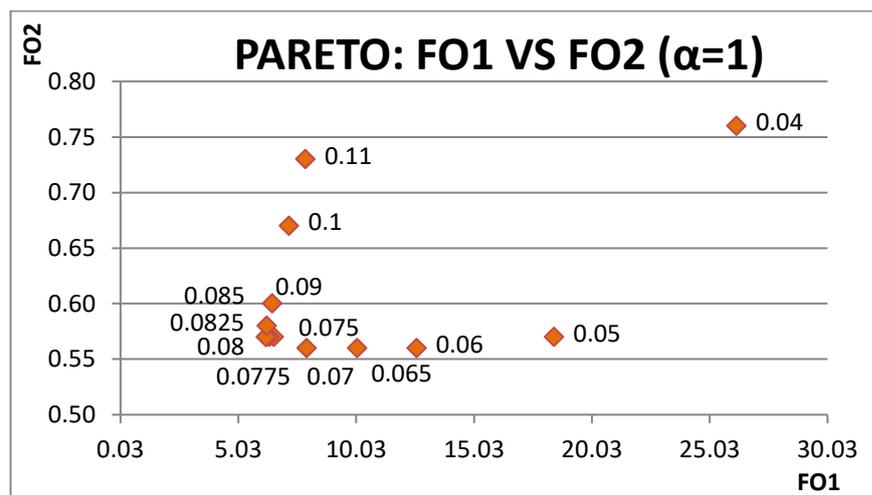


Figura 3.2: Función objetivo 1 vs función objetivo 2,  $\alpha=1$ , error promedio, 9-12 marzo 2017, con todos los valores de rugosidad.

Fuente: Autora.

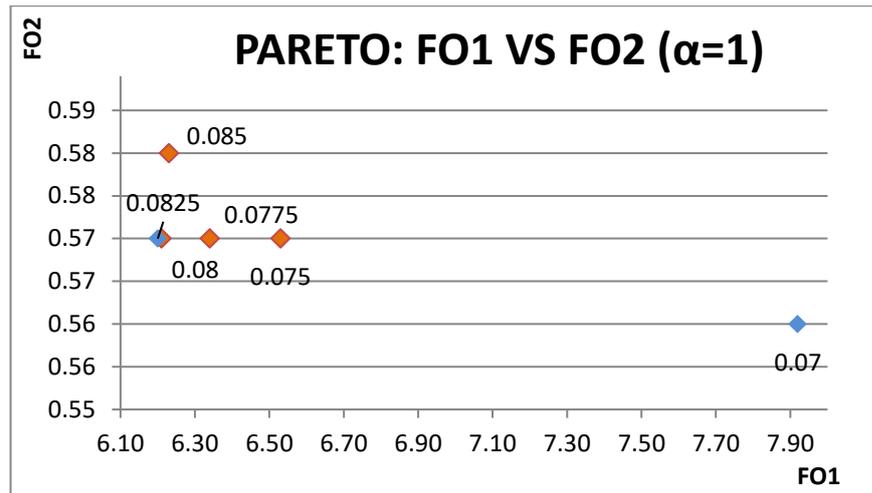


Figura 3.3: Función objetivo 1 vs función objetivo 2,  $\alpha= 1$ , error promedio, 9-12 marzo 2017, valores de interés.

Fuente: Autora.

En esta figura se puede observar que la menor relación entre funciones objetivo corresponde a las rugosidades iniciales de: 0.07 y 0.0825.

A estos valores se los conoce como valores no dominados, un valor es no dominado si tiene al menos una función objetivo menor a los demás, haciendo un análisis de cada punto:

- FO1 de 0.0825 < FO1 de 0.07, pero FO2 de 0.0825 > FO2 de 0.07.

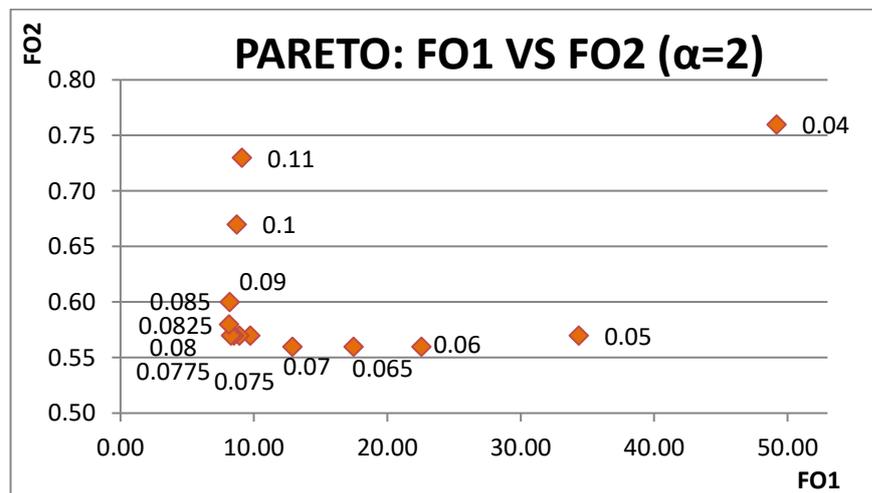


Figura 3.4: Función objetivo 1 vs función objetivo 2,  $\alpha= 2$ , error promedio, 9-12 marzo 2017, con todos los valores de rugosidad.

Fuente: Autora.

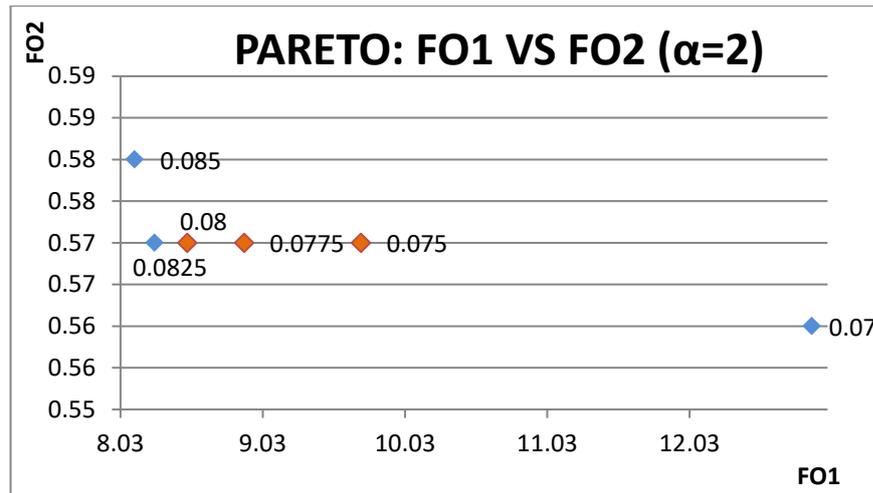


Figura 3.5: Función objetivo 1 vs función objetivo 2,  $\alpha= 2$ , error promedio, 9-12 marzo 2017, valores de interés.

Fuente: Autora.

En esta figura se muestra un acercamiento de los valores que tienen la menor relación entre funciones esta son las rugosidades: 0.07, 0.0825 y 0.085.

Son valores no dominados porque:

- FO1 de 0.085 < FO1 de 0.0825, pero FO2 de 0.085 > FO2 de 0.0825.
- FO1 de 0.0825 < FO1 de 0.07, pero FO2 de 0.0825 > FO2 de 0.07.

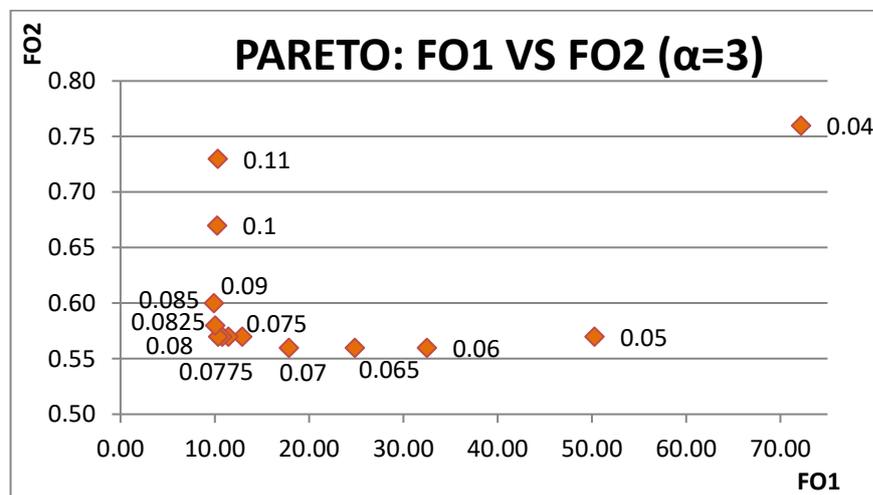


Figura 3.6: Función objetivo 1 vs función objetivo 2,  $\alpha= 3$ , error promedio, 9-12 marzo 2017, con todos los valores de rugosidad.

Fuente: Autora.

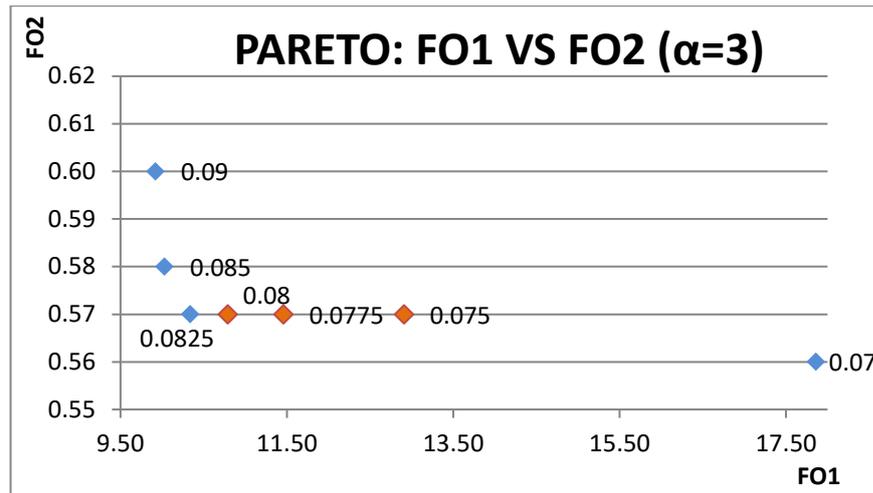


Figura 3.7: Función objetivo 1 vs función objetivo 2,  $\alpha=3$ , error promedio, 9-12 marzo 2017, valores de interés.

Fuente: Autora.

En esta figura se acerca a los valores más bajos de la gráfica anterior y se determina que la menor relación de funciones, se encuentra entre los valores de rugosidades 0.07, 0.0825, 0.085 y 0.09. Son valores no dominados porque:

- FO1 de 0.09 < FO1 de 0.085, pero FO2 de 0.09 > FO2 de 0.085.
- FO1 de 0.085 < FO1 de 0.0825, pero FO2 de 0.085 > FO2 de 0.0825.
- FO1 de 0.0825 < FO1 de 0.07, pero FO2 de 0.0825 > FO2 de 0.07.

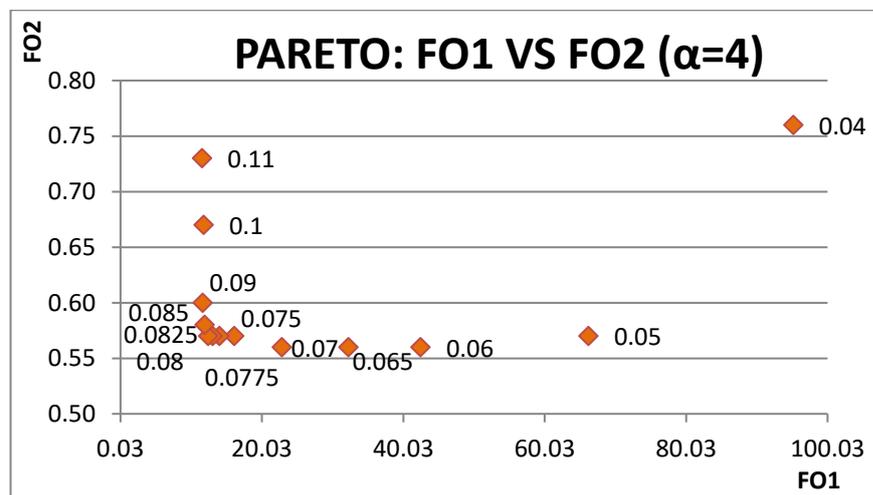


Figura 3.8: Función objetivo 1 vs función objetivo 2,  $\alpha=4$ , error promedio, 9-12 marzo 2017, con todos los valores de rugosidad.

Fuente: Autora.

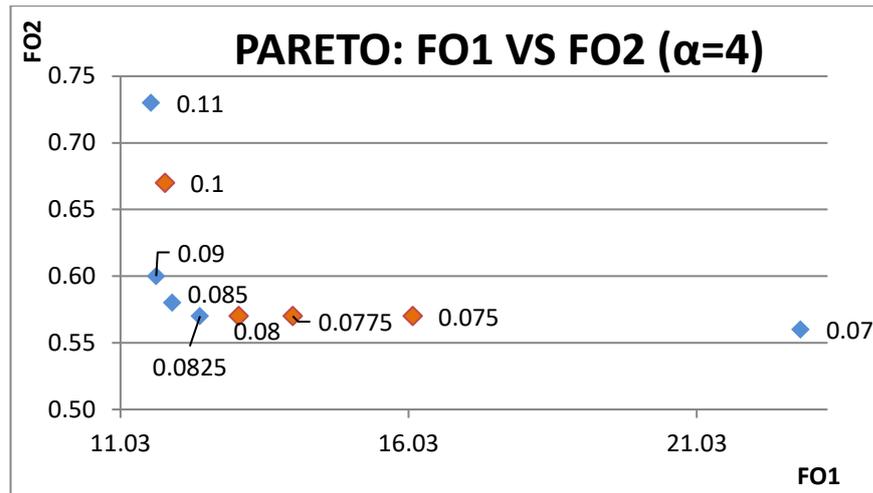


Figura 3.9: Función objetivo 1 vs función objetivo 2,  $\alpha=4$ , error promedio, 9-12 marzo 2017, valores de interés.

Fuente: Autora.

Dentro de esta figura la menor relación entre funciones objetivo corresponde a las rugosidades iniciales 0.07, 0.0825, 0.085, 0.09 y 0.11.

Estos valores son no dominados porque:

- FO1 de 0.11 < FO1 de 0.09, pero FO2 de 0.11 > FO2 de 0.09.
- FO1 de 0.09 < FO1 de 0.085, pero FO2 de 0.09 > FO2 de 0.085.
- FO1 de 0.085 < FO1 de 0.0825, pero FO2 de 0.085 > FO2 de 0.0825.
- FO1 de 0.0825 < FO1 de 0.07, pero FO2 de 0.0825 > FO2 de 0.07.

### 3.1.1.2. Error cuadrático

Tabla 3.2: Resumen frente de Pareto 1, error cuadrático, 9-12 marzo 2017.

n	FO1 para cada valor de $\alpha$				FO2
	1	2	3	4	
0.04	26.13	49.11	72.09	95.07	0.76
0.05	18.44	34.39	50.34	66.29	0.57
0.06	12.59	22.55	32.51	42.47	0.56
0.065	10.11	17.46	24.81	32.16	0.56
0.07	7.93	12.89	17.85	22.81	0.56
0.075	6.67	9.80	12.93	16.06	0.57
0.0775	6.46	8.92	11.38	13.84	0.57
0.08	6.32	8.36	10.40	12.44	0.57
0.0825	6.46	8.27	10.08	11.89	0.57
0.085	6.49	8.20	9.91	11.62	0.58
0.09	6.70	8.21	9.72	11.23	0.60
0.1	7.36	8.65	9.94	11.23	0.67
0.11	8.17	9.15	10.13	11.11	0.73

Fuente: Autora.

En esta tabla se presenta el resumen de los resultados obtenidos para el error cuadrático, en donde se observa que los menores valores de FO1 se encuentran entre las rugosidades 0.075 a 0.11 mientras que para la FO2 entre 0.05 y 0.0825.

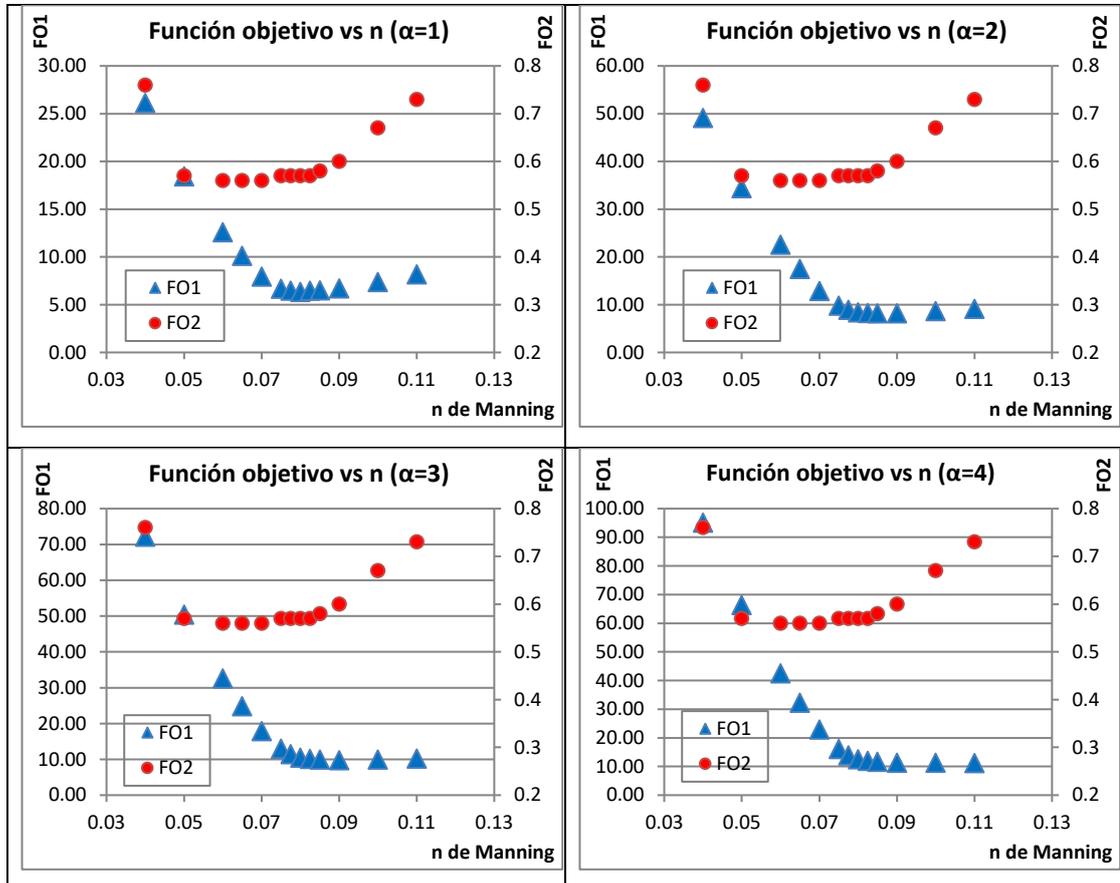


Figura 3.10: Función objetivo vs n de Manning,  $\alpha=1, 2, 3$  y  $4$ , error cuadrático, 9-12 marzo 2017.

Fuente: Autora.

En las gráficas presentadas anteriormente se puede observar que la parte cóncava de las curvas coinciden entre los valores de rugosidad inicial de 0.07 a 0.11.

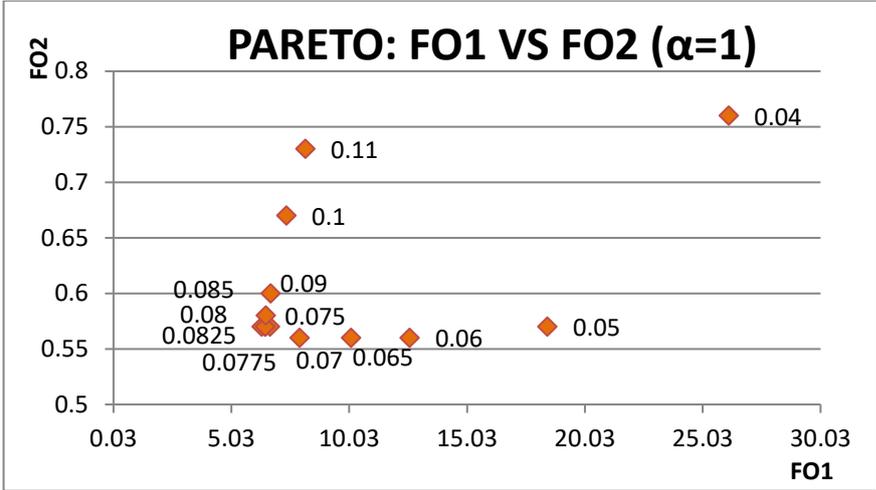


Figura 3.11: Función objetivo 1 vs función objetivo 2,  $\alpha=1$ , error cuadrático, 9-12 marzo 2017, con todos los valores de rugosidad.

Fuente: Autora.

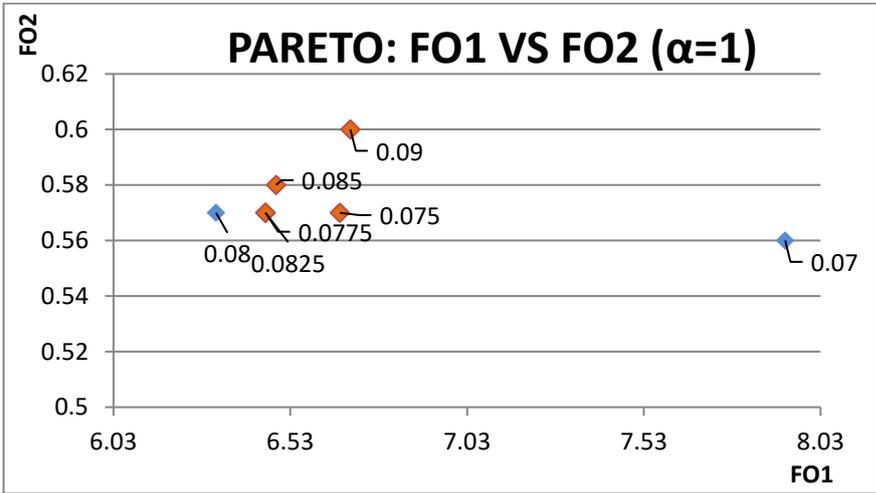


Figura 3.12: Función objetivo 1 vs función objetivo 2,  $\alpha=1$ , error cuadrático, 9-12 marzo 2017, valores de interés.

Fuente: Autora.

Se puede observar que las rugosidades en donde existe menor relación entre funciones objetivo son entre 0.07 y 0.08.

Estos valores son no dominados porque:

- FO1 de 0.08 < FO1 de 0.07, pero FO2 de 0.08 > FO2 de 0.07.

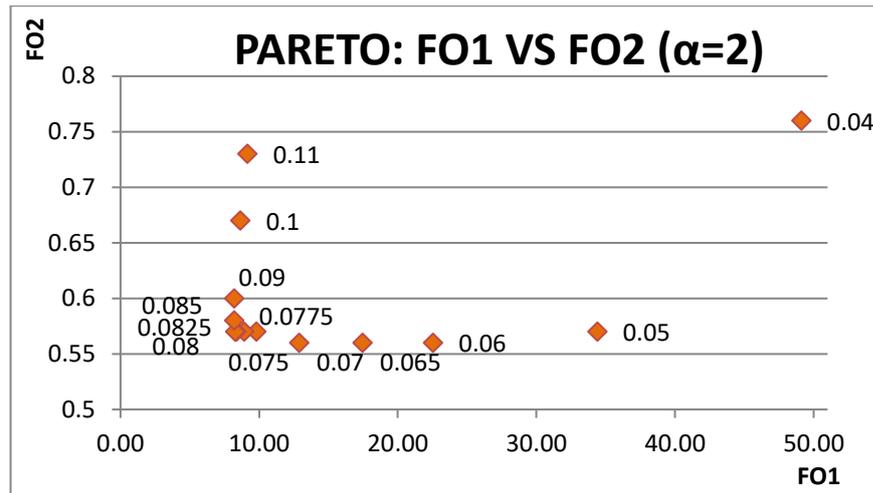


Figura 3.13: Función objetivo 1 vs función objetivo 2,  $\alpha=2$ , error cuadrático, 9-12 marzo 2017, con todos los valores de rugosidad.

Fuente: Autora.

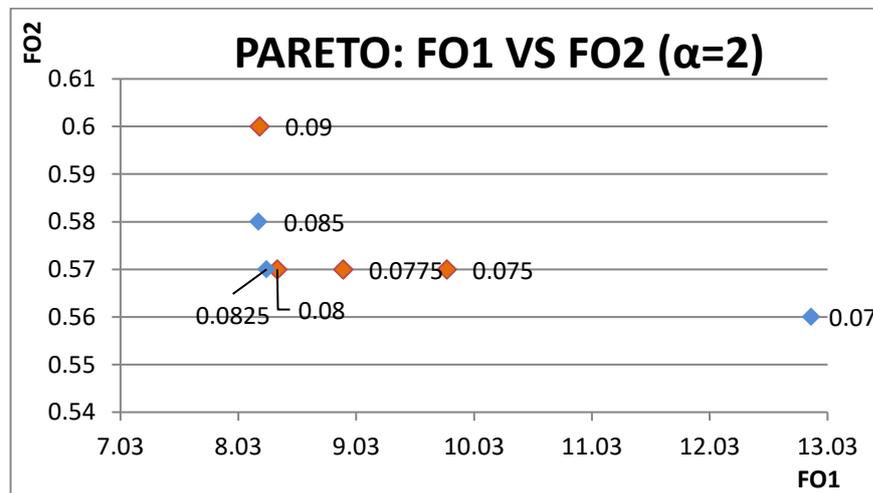


Figura 3.14: Función objetivo 1 vs función objetivo 2,  $\alpha=2$ , error cuadrático, 9-12 marzo 2017, valores de interés.

Fuente: Autora.

En esta gráfica las rugosidades que predominan están entre 0.07, 0.0825 y 0.085.

Estos valores son no dominados porque:

- FO1 de 0.085 < FO1 de 0.0825, pero FO2 de 0.085 > FO2 de 0.0825.
- FO1 de 0.0825 < FO1 de 0.07, pero FO2 de 0.0825 > FO2 de 0.07.

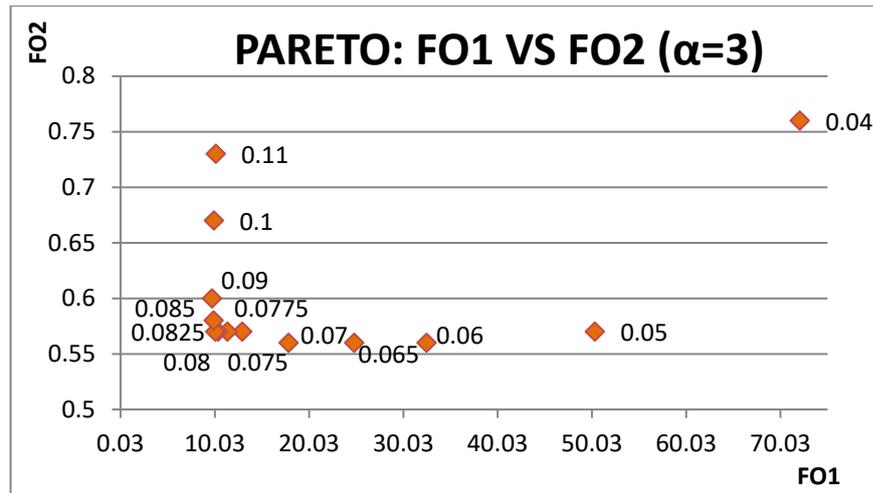


Figura 3.15: Función objetivo 1 vs función objetivo 2,  $\alpha=3$ , error cuadrático, 9-12 marzo 2017, con todos los valores de rugosidad.

Fuente: Autora.

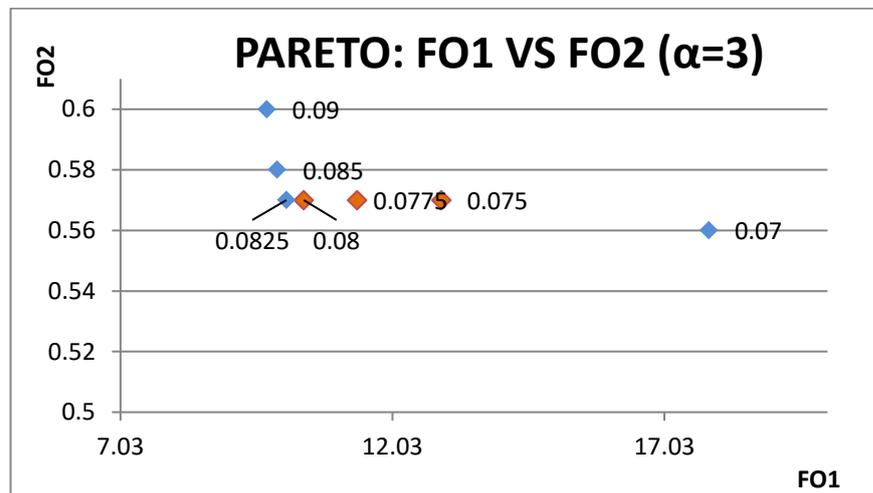


Figura 3.16: Función objetivo 1 vs función objetivo 2,  $\alpha=3$ , error cuadrático, 9-12 marzo 2017, valores de interés.

Fuente: Autora.

En esta gráfica las rugosidades en donde existe una menor relación entre funciones están entre 0.07, 0.0825, 0.085 y 0.09.

Estos valores son no dominados porque:

- FO1 de 0.09 < FO1 de 0.0825, pero FO2 de 0.09 > FO2 de 0.0825.
- FO1 de 0.085 < FO1 de 0.0825, pero FO2 de 0.085 > FO2 de 0.0825.
- FO1 de 0.0825 < FO1 de 0.07, pero FO2 de 0.0825 > FO2 de 0.07.

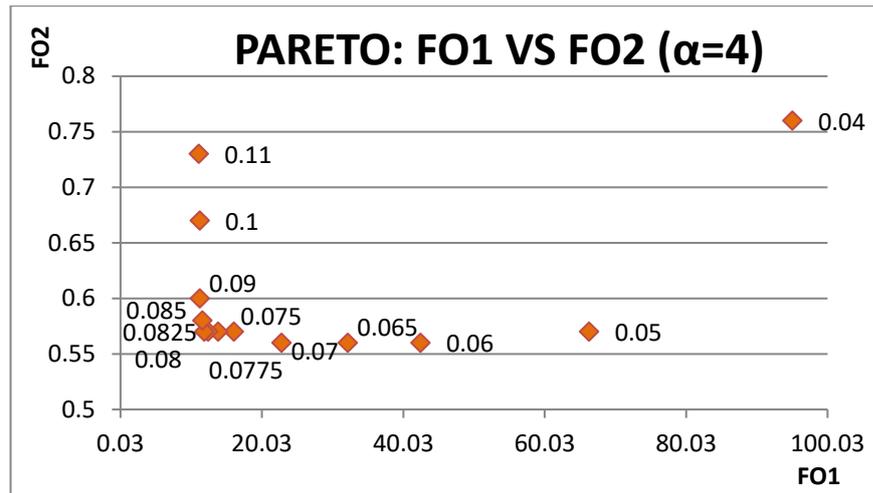


Figura 3.17: Función objetivo 1 vs función objetivo 2,  $\alpha=4$ , error cuadrático, 9-12 marzo 2017, con todos los valores de rugosidad.

Fuente: Autora.

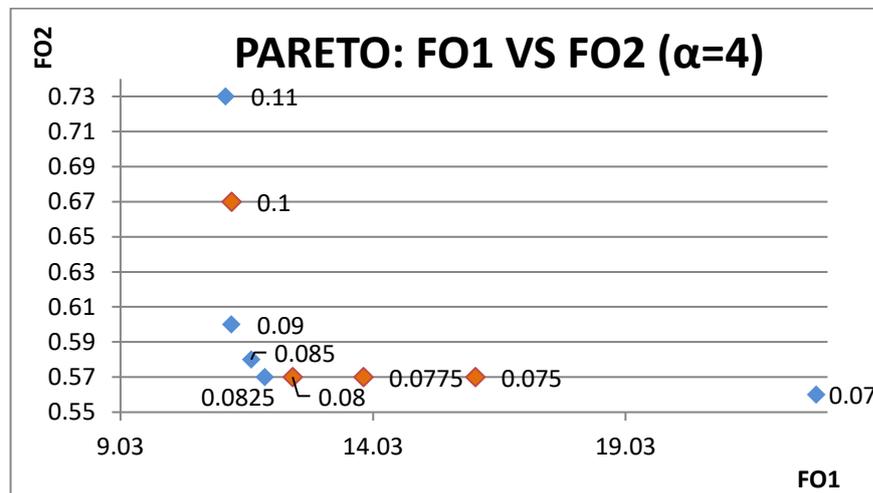


Figura 3.18: Función objetivo 1 vs función objetivo 2,  $\alpha=4$ , error cuadrático, 9-12 marzo 2017, valores de interés.

Fuente: Autora.

Como se mencionó anteriormente en esta gráfica las rugosidades con menor relación en las funciones objetivo son 0.07, 0.0825, 0.085, 0.09 y 0.11.

Estos valores son no dominados porque:

- FO1 de 0.11 < FO1 de 0.09, pero FO2 de 0.11 > FO2 de 0.09.
- FO1 de 0.09 < FO1 de 0.085, pero FO2 de 0.09 > FO2 de 0.085.
- FO1 de 0.085 < FO1 de 0.0825, pero FO2 de 0.085 > FO2 de 0.0825.
- FO1 de 0.0825 < FO1 de 0.07, pero FO2 de 0.0825 > FO2 de 0.07.

Una vez obtenidos los valores no dominados para el frente de Pareto uno, se realiza una tabla resumen con el fin de tener la información sintetizada de los valores no dominados obtenidos en el análisis de cada una de las figuras posteriores y de esta manera poder encontrar el promedio de las rugosidades, el mismo que haría que tanto la FO1 como la FO2 no presenten valores muy altos ni muy bajos, es decir, un valor intermedio. Para este frente de Pareto los valores de rugosidad se encuentran entre 0.07 y 0.11, teniendo como promedio el valor de 0.082.

Tabla 3.3: Resumen valores no dominados, frente de Pareto 1, 9-12 marzo 2017.

Valor de $\alpha$	Método de evaluación del error del HEC-RAS	
	Error promedio	Error cuadrático
1	0.07	0.07
	0.0825	0.08
2	0.07	0.07
	0.0825 0.085	0.0825 0.085
3	0.07	0.07
	0.0825	0.0825
	0.085 0.09	0.085 0.09
4	0.07	0.07
	0.0825	0.0825
	0.085	0.085
	0.09 0.11	0.09 0.11

Fuente: Autora.

### 3.1.2. Frente de Pareto 2

Función objetivo 1

$$E_i = \begin{cases} [(y_{obs} - y_{sim})] \times \alpha & \text{para } y_{sim} \leq y_{obs} \\ [(y_{obs} - y_{sim})] & \text{para } y_{sim} > y_{obs} \end{cases}$$

$$FO1 = \frac{\sum E_i}{k} \quad \alpha = 1, 2, 3, 4$$

$k = \text{número de datos}$

Función objetivo 2

$$FO2 = MAX(E_i)$$

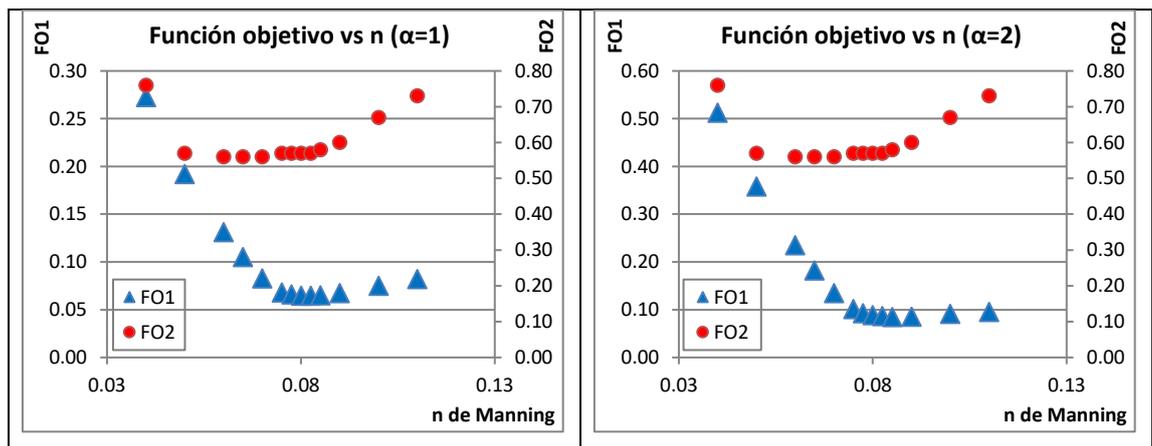
3.1.2.1. Error promedio

Tabla 3.4: Resumen frente de Pareto 2, error promedio, 9-12 marzo 2017.

n	FO1 para cada valor de $\alpha$				FO2
	1	2	3	4	
0.04	0.272	0.512	0.752	0.992	0.760
0.05	0.192	0.358	0.524	0.690	0.570
0.06	0.131	0.235	0.339	0.442	0.560
0.065	0.105	0.182	0.259	0.336	0.560
0.07	0.083	0.134	0.186	0.238	0.560
0.075	0.068	0.101	0.134	0.168	0.570
0.0775	0.066	0.093	0.119	0.146	0.570
0.08	0.065	0.089	0.112	0.136	0.570
0.0825	0.065	0.086	0.108	0.129	0.570
0.085	0.065	0.085	0.104	0.124	0.580
0.09	0.067	0.085	0.103	0.121	0.600
0.1	0.075	0.091	0.107	0.123	0.670
0.11	0.082	0.095	0.108	0.120	0.730

Fuente: Autora.

En la última tabla presentada se muestra un resumen de los datos obtenidos de los cálculos del frente de Pareto 2 con cada una de las funciones objetivo, en donde se puede ver que los menores valores para la FO1 se encuentran entre las rugosidades 0.075 y 0.11 mientras que para la FO2 están entre 0.05 y 0.085.



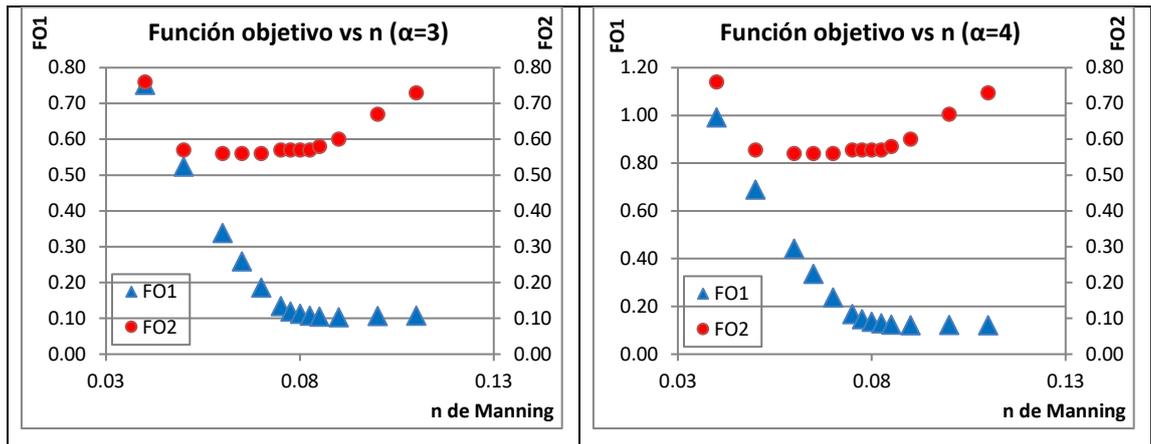


Figura 3.19: Función objetivo vs n de Manning,  $\alpha=1, 2, 3$  y  $4$ , error promedio, 9-12 marzo 2017.

Fuente: Autora.

Para este frente de Pareto se puede observar que los valores de rugosidad con menor relación entre funciones objetivo van a estar entre el rango de 0.07 hasta 0.11.

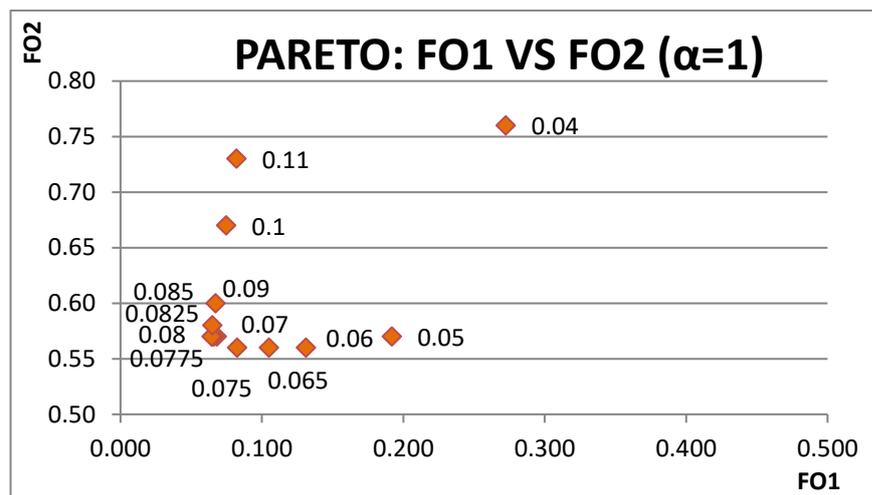


Figura 3.20: Función objetivo 1 vs función objetivo 2,  $\alpha= 1$ , error promedio, 9-12 marzo 2017, con todos los valores de rugosidad.

Fuente: Autora.

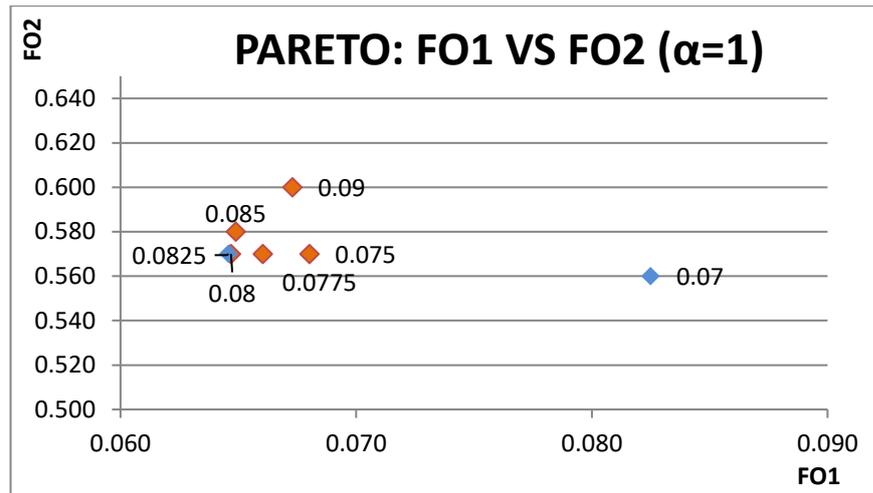


Figura 3.21: Función objetivo 1 vs función objetivo 2,  $\alpha= 1$ , error promedio, 9-12 marzo 2017, valores de interés.

Fuente: Autora.

En la presente figura la rugosidad con menor relación entre funciones objetivo se encuentra entre los valores de 0.07, y 0.0825.

Estos valores son no dominados porque:

- FO1 de 0.0825 < FO1 de 0.07, pero FO2 de 0.0825 > FO2 de 0.07.

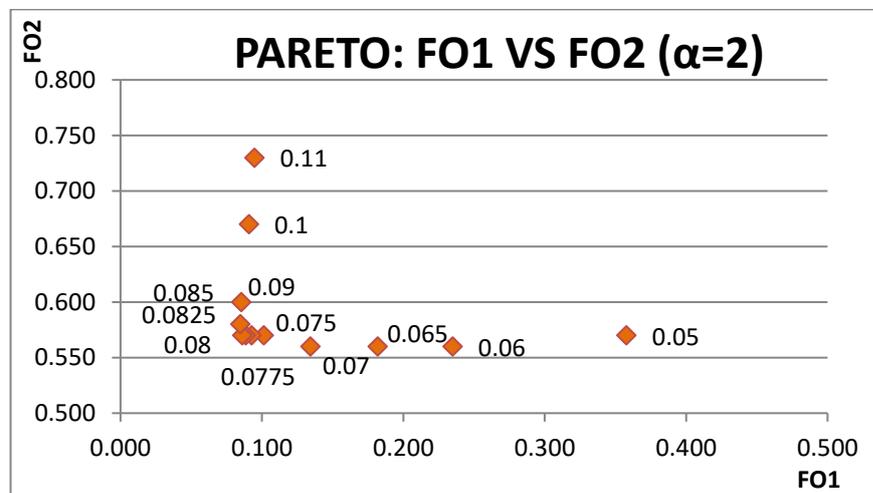


Figura 3.22: Función objetivo 1 vs función objetivo 2,  $\alpha= 2$ , error promedio, 9-12 marzo 2017, con todos los valores de rugosidad.

Fuente: Autora.

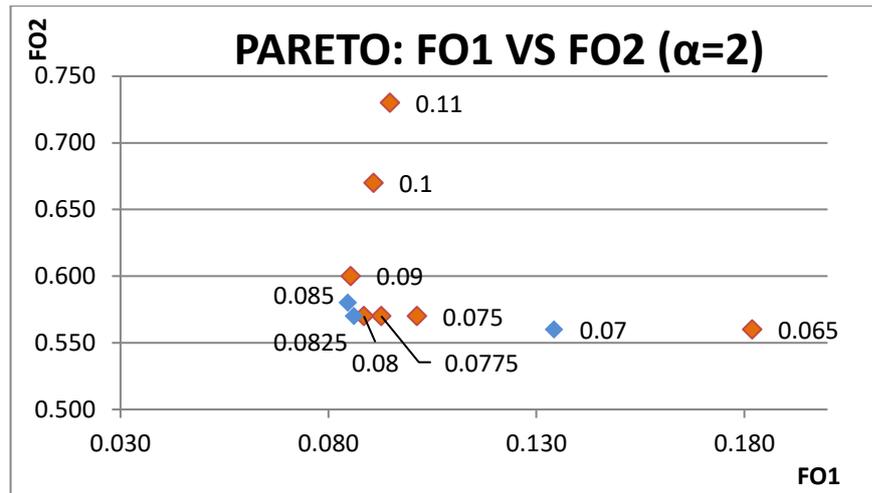


Figura 3.23: Función objetivo 1 vs función objetivo 2,  $\alpha=2$ , error promedio, 9-12 marzo 2017, valores de interés.

Fuente: Autora.

En la presente gráfica las rugosidades con la que se tiene la menor relación entre funciones objetivo son 0.07, 0.0825 y 0.085.

Estos valores son no dominados porque:

- FO1 de 0.085 < FO1 de 0.0825, pero FO2 de 0.085 > FO2 de 0.0825.
- FO1 de 0.0825 < FO1 de 0.07, pero FO2 de 0.0825 > FO2 de 0.07.

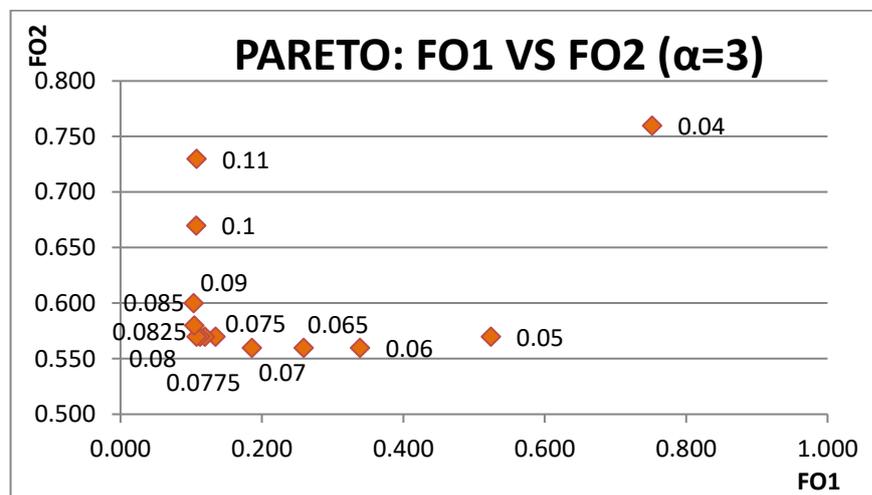


Figura 3.24: Función objetivo 1 vs función objetivo 2,  $\alpha=3$ , error promedio, 9-12 marzo 2017, con todos los valores de rugosidad.

Fuente: Autora.

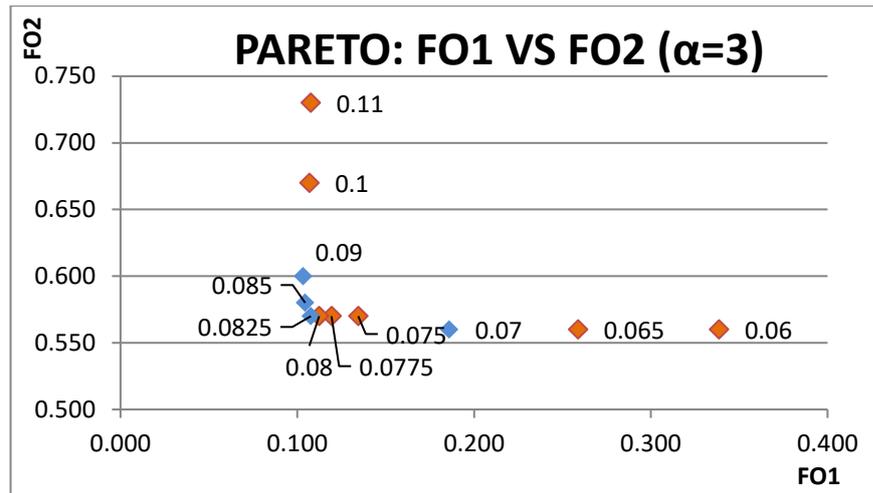


Figura 3.25: Función objetivo 1 vs función objetivo 2,  $\alpha=3$ , error promedio, 9-12 marzo 2017, valores de interés.

Fuente: Autora.

Dentro de esta gráfica se puede observar que las rugosidades con menor relación entre funciones objetivo son 0.07, 0.0825, 0.085 y 0.09.

Estos valores son no dominados porque:

- FO1 de 0.09 < FO1 de 0.085, pero FO2 de 0.09 > FO2 de 0.085.
- FO1 de 0.085 < FO1 de 0.0825, pero FO2 de 0.085 > FO2 de 0.0825.
- FO1 de 0.0825 < FO1 de 0.07, pero FO2 de 0.0825 > FO2 de 0.07.

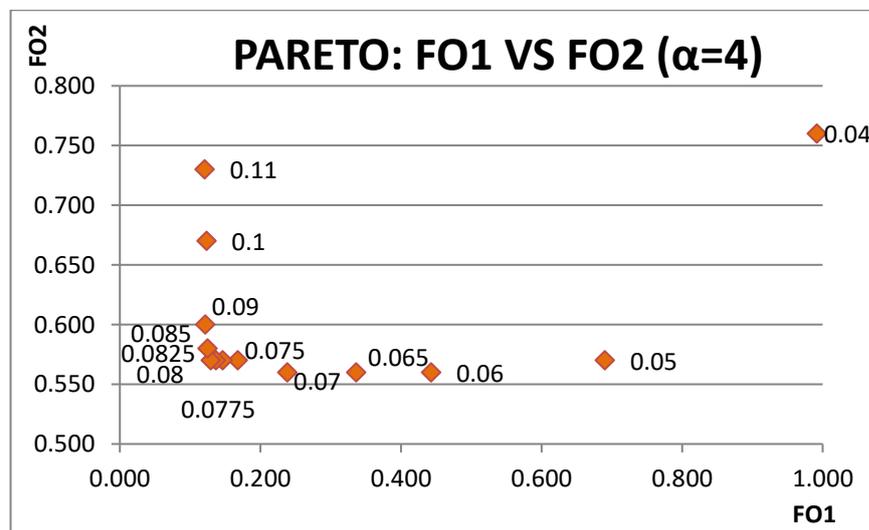


Figura 3.26: Función objetivo 1 vs función objetivo 2,  $\alpha=4$ , error promedio, 9-12 marzo 2017, con todos los valores de rugosidad.

Fuente: Autora.

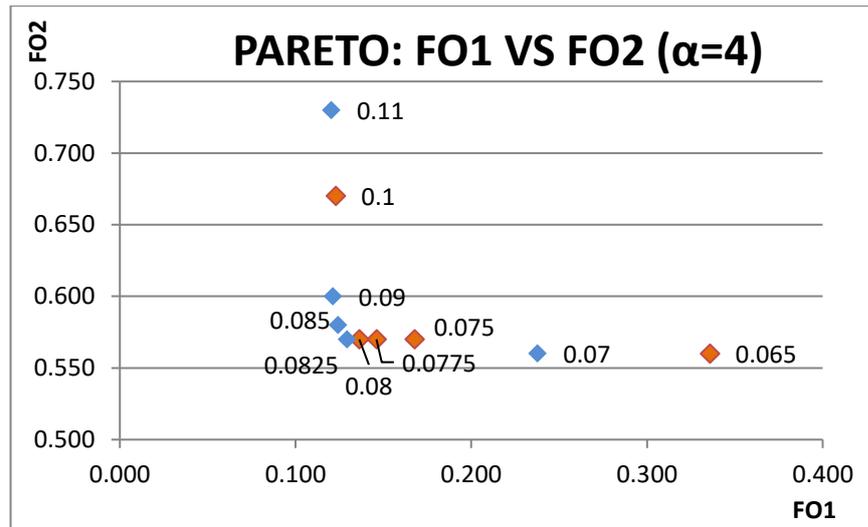


Figura 3.27: Función objetivo 1 vs función objetivo 2,  $\alpha=4$ , error promedio, 9-12 marzo 2017, valores de interés.

Fuente: Autora.

En esta gráfica se puede ver que las rugosidades con menor relación entre funciones objetivo son 0.07, 0.0825, 0.085, 0.09 y 0.11.

Estos valores son no dominados porque:

- FO1 de 0.11 < FO1 de 0.09, pero FO2 de 0.11 > FO2 de 0.09.
- FO1 de 0.09 < FO1 de 0.085, pero FO2 de 0.09 > FO2 de 0.085.
- FO1 de 0.085 < FO1 de 0.0825, pero FO2 de 0.085 > FO2 de 0.0825.
- FO1 de 0.0825 < FO1 de 0.07, pero FO2 de 0.0825 > FO2 de 0.07.

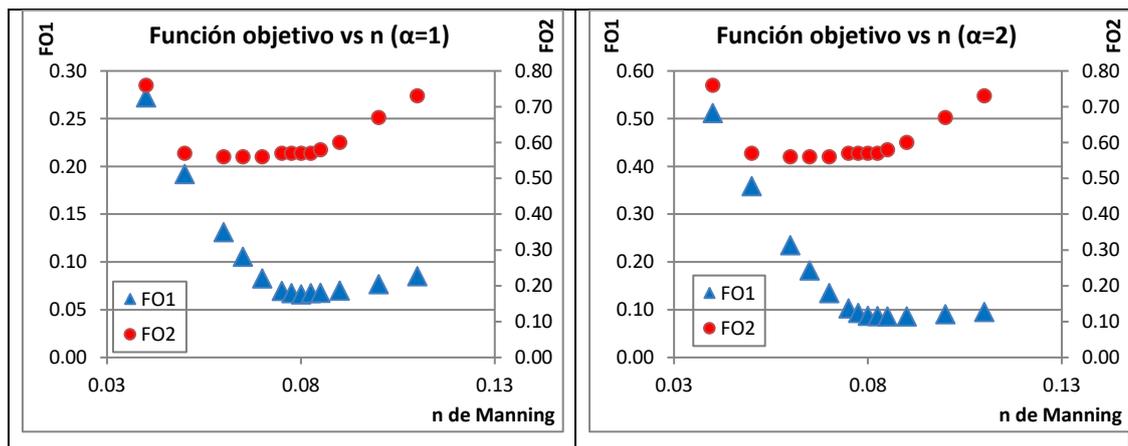
3.1.2.2. Error cuadrático

Tabla 3.5: Resumen frente de Pareto 2, error cuadrático, 9-12 marzo 2017.

n	FO1 para cada valor de $\alpha$				FO2
	1	2	3	4	
0.04	0.272	0.512	0.751	0.990	0.760
0.05	0.192	0.358	0.524	0.691	0.570
0.06	0.131	0.235	0.339	0.442	0.560
0.065	0.105	0.182	0.258	0.335	0.560
0.07	0.083	0.134	0.186	0.238	0.560
0.075	0.069	0.102	0.135	0.167	0.570
0.0775	0.067	0.093	0.119	0.144	0.570
0.08	0.066	0.087	0.108	0.130	0.570
0.0825	0.067	0.086	0.105	0.124	0.570
0.085	0.068	0.085	0.103	0.121	0.580
0.09	0.070	0.086	0.101	0.117	0.600
0.1	0.077	0.090	0.104	0.117	0.670
0.11	0.085	0.095	0.106	0.116	0.730

Fuente: Autora.

En la presente tabla se muestra la recopilación de resultados de los cálculos realizados en el frente de Pareto 2 con cada función objetivo, analizado con el error cuadrático, que muestra que los menores valores para la FO1 se encuentran entre las rugosidades de 0.075 y 0.11, mientras que para la FO2 están entre 0.05 y 0.085.



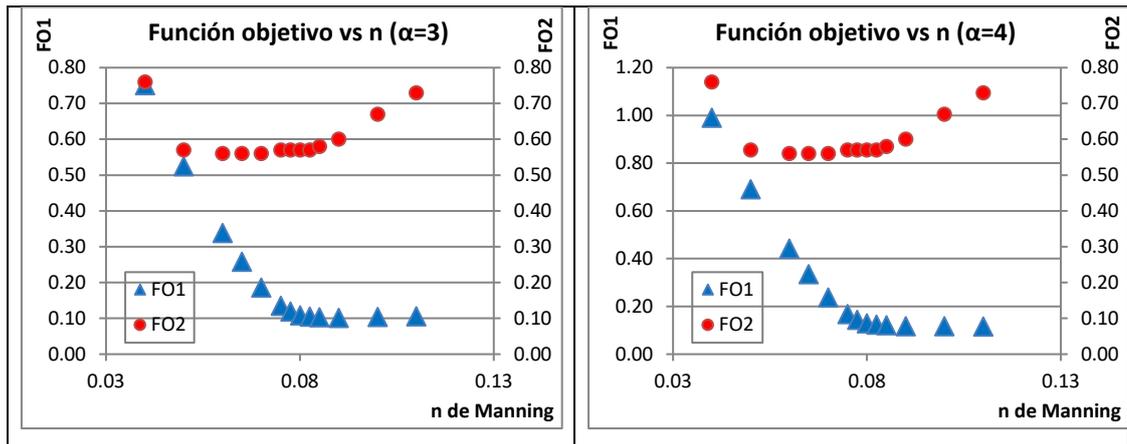


Figura 3.28: Función objetivo vs n de Manning,  $\alpha=1, 2, 3$  y  $4$ , error cuadrático, 9-12 marzo 2017.

Fuente: Autora.

Al ver las últimas 4 gráficas, se puede observar que las rugosidades con menor relación entre funciones objetivo se van a encontrar entre los valores de 0.07 y 0.11.

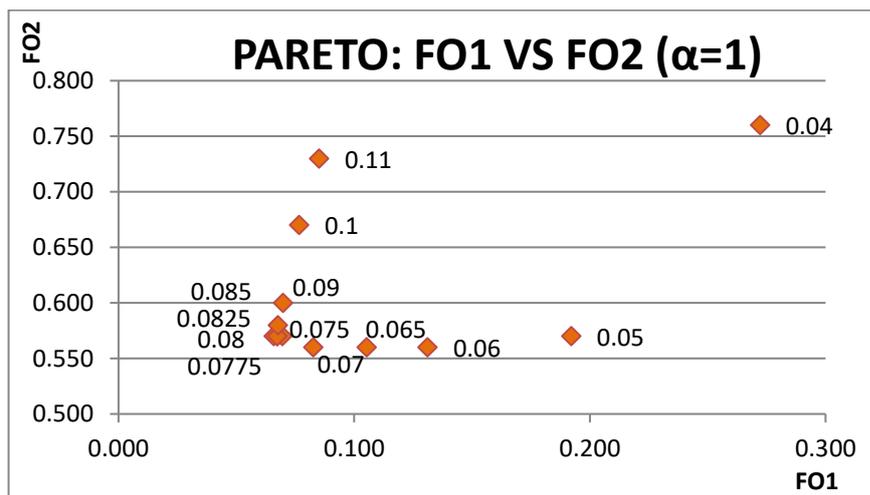


Figura 3.29: Función objetivo 1 vs función objetivo 2,  $\alpha=1$ , error cuadrático, 9-12 marzo 2017, con todos los valores de rugosidad.

Fuente: Autora.

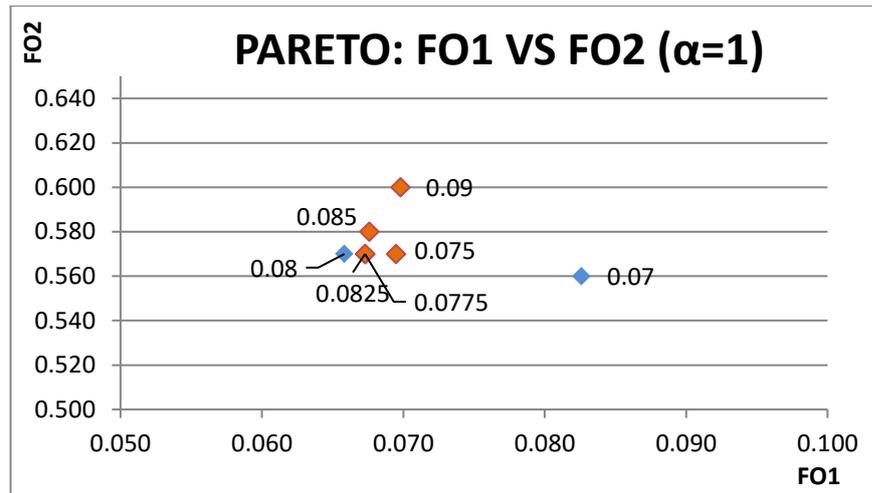


Figura 3.30: Función objetivo 1 vs función objetivo 2,  $\alpha=1$ , error cuadrático, 9-12 marzo 2017, valores de interés.

Fuente: Autora.

Esta gráfica muestra que la menor relación entre funciones objetivo está en las rugosidades 0.07 y 0.08.

Estos valores son no dominados porque:

- FO1 de 0.08 < FO1 de 0.07, pero FO2 de 0.08 > FO2 de 0.07.

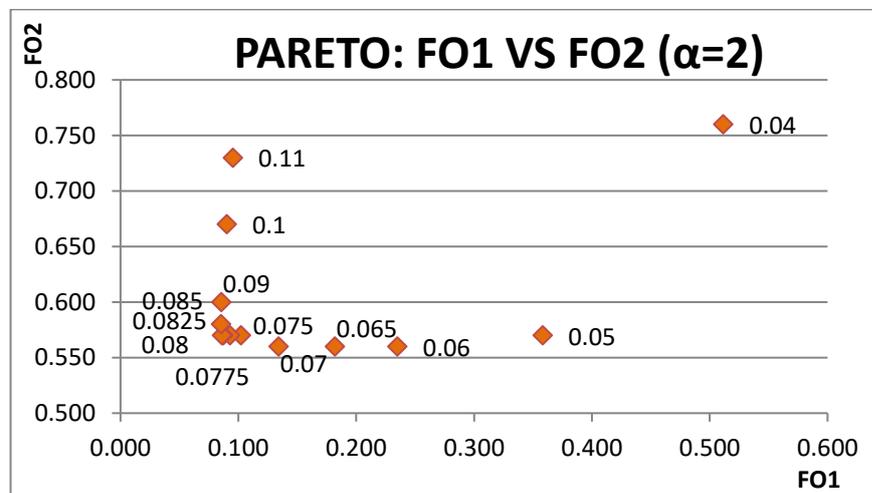


Figura 3.31: Función objetivo 1 vs función objetivo 2,  $\alpha=2$ , error cuadrático, 9-12 marzo 2017, con todos los valores de rugosidad.

Fuente: Autora.

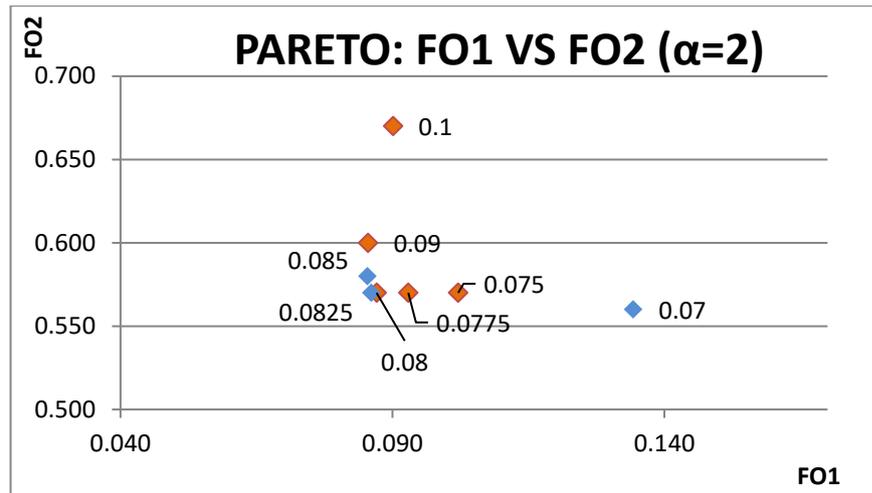


Figura 3.32: Función objetivo 1 vs función objetivo 2,  $\alpha=2$ , error cuadrático, 9-12 marzo 2017, valores de interés.

Fuente: Autora.

Dentro de esta figura se puede ver que las rugosidades con menor relación entre funciones objetivo son 0.07, 0.0825 y 0.085.

Estos valores son no dominados porque:

- FO1 de 0.085 < FO1 de 0.0825, pero FO2 de 0.085 > FO2 de 0.0825.
- FO1 de 0.0825 < FO1 de 0.07, pero FO2 de 0.0825 > FO2 de 0.07.

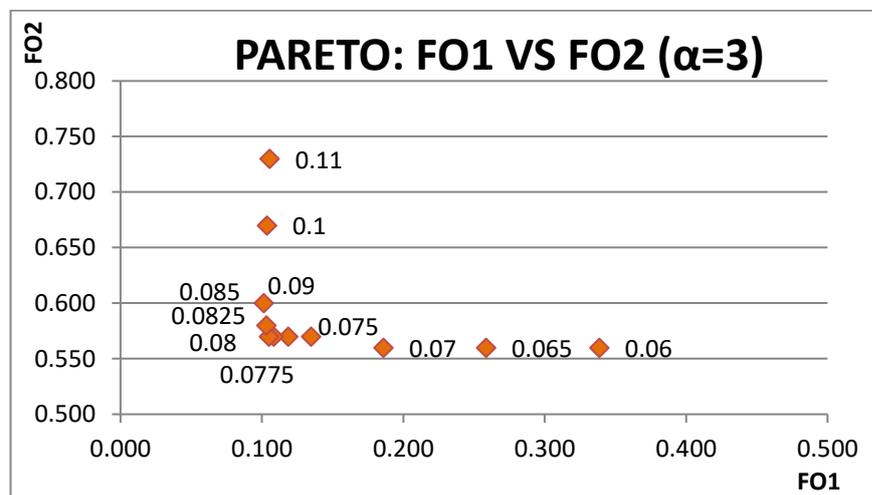


Figura 3.33: Función objetivo 1 vs función objetivo 2,  $\alpha=3$ , error cuadrático, 9-12 marzo 2017, con todos los valores de rugosidad.

Fuente: Autora.

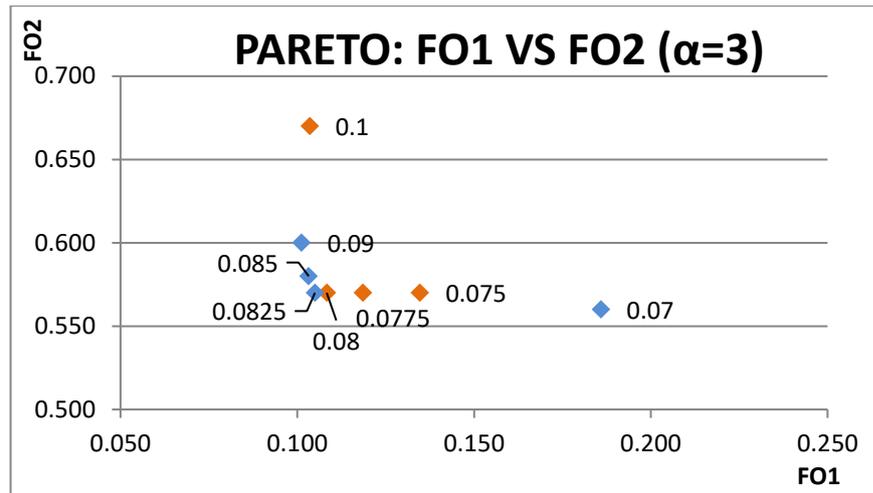


Figura 3.34: Función objetivo 1 vs función objetivo 2,  $\alpha=3$ , error cuadrático, 9-12 marzo 2017, valores de interés.

Fuente: Autora.

De igual manera que en la figura anterior las rugosidades con menor relación entre funciones objetivo son 0.07, 0.0825, 0.085 y 0.09.

Estos valores son no dominados porque:

- FO1 de 0.0825 < FO1 de 0.07, pero FO2 de 0.0825 > FO2 de 0.07.
- FO1 de 0.085 < FO1 de 0.0825, pero FO2 de 0.085 > FO2 de 0.0825.
- FO1 de 0.09 < FO1 de 0.085, pero FO2 de 0.09 > FO2 de 0.085.

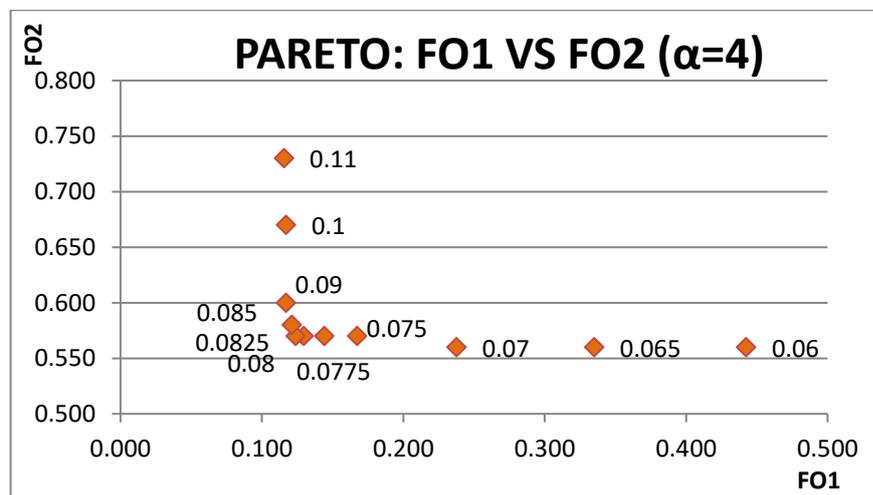


Figura 3.35: Función objetivo 1 vs función objetivo 2,  $\alpha=4$ , error cuadrático, 9-12 marzo 2017, con todos los valores de rugosidad.

Fuente: Autora.

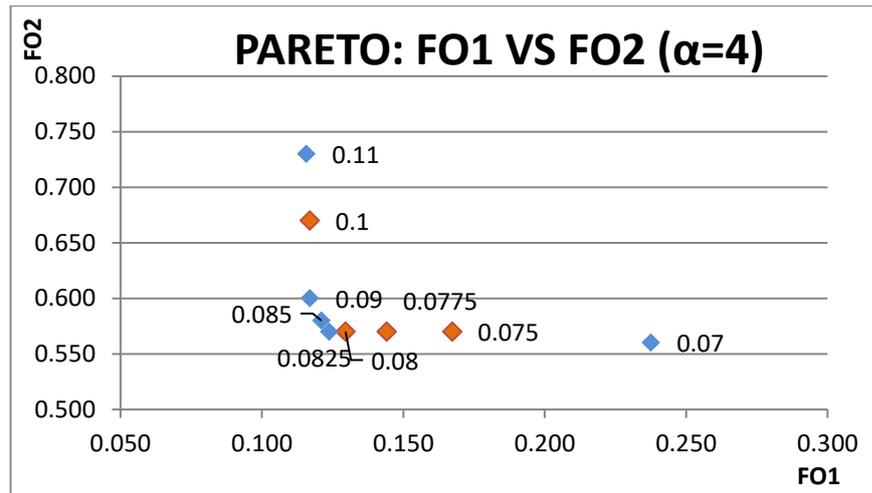


Figura 3.36: Función objetivo 1 vs función objetivo 2,  $\alpha=4$ , error cuadrático, 9-12 marzo 2017, valores de interés.

Fuente: Autora.

En esta última gráfica las rugosidades con menor relación entre funciones objetivo son 0.07, 0.0825, 0.085, 0.09 y 0.11.

Estos valores son no dominados porque:

- FO1 de 0.11 < FO1 de 0.09, pero FO2 de 0.11 > FO2 de 0.09.
- FO1 de 0.09 < FO1 de 0.085, pero FO2 de 0.09 > FO2 de 0.085.
- FO1 de 0.085 < FO1 de 0.0825, pero FO2 de 0.085 > FO2 de 0.0825.
- FO1 de 0.085 < FO1 de 0.07, pero FO2 de 0.085 > FO2 de 0.07.

A continuación, se presenta una tabla con la recopilación de los valores no dominados, con el fin de sintetizar la información y conocer el rango de rugosidades iniciales para este frente, el cual se encuentra entre 0.07 y 0.11 teniendo como promedio el valor de 0.082.

Tabla 3.6: Resumen valores no dominados, frente de Pareto 2, 9-12 marzo 2017.

Valor de $\alpha$	Método de evaluación del error del HEC-RAS	
	Error promedio	Error cuadrático
1	0.07	0.07
	0.0825	0.08
2	0.07	0.07
	0.0825 0.085	0.0825 0.085
3	0.07	0.07
	0.0825	0.0825
	0.085 0.09	0.085 0.09
4	0.07	0.07
	0.0825	0.0825
	0.085	0.085
	0.09 0.11	0.09 0.11

Fuente: Autora.

### 3.1.3. Frente de Pareto 3

Función objetivo 1

$$E_i = \begin{cases} \left[ \frac{(y_{obs} - y_{sim})^2}{y_{obs}} \right] \times \alpha & \text{para } y_{sim} \leq y_{obs} \\ \left[ \frac{(y_{obs} - y_{sim})^2}{y_{obs}} \right] & \text{para } y_{sim} > y_{obs} \end{cases}$$

$$FO1 = \sum E_i \quad \alpha = 1, 2, 3, 4$$

Función objetivo 2

$$FO2 = MAX(E_i)$$

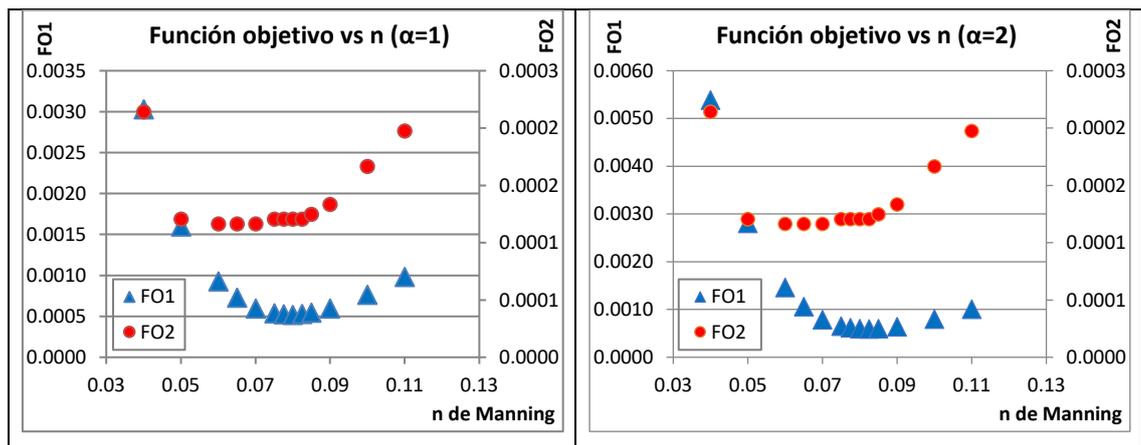
### 3.1.3.1. Error promedio

Tabla 3.7: Resumen frente de Pareto 3, error promedio, 9-12 marzo 2017.

n	FO1 para cada valor de $\alpha$				FO2
	1	2	3	4	
0.04	0.00303	0.00538	0.00773	0.01009	0.000214
0.05	0.00160	0.00280	0.00400	0.00520	0.000120
0.06	0.00092	0.00145	0.00199	0.00252	0.000116
0.065	0.00072	0.00105	0.00139	0.00172	0.000116
0.07	0.00059	0.00078	0.00098	0.00117	0.000116
0.075	0.00053	0.00065	0.00077	0.00088	0.000120
0.0775	0.00052	0.00061	0.00070	0.00080	0.000120
0.08	0.00052	0.00059	0.00067	0.00075	0.000120
0.0825	0.00053	0.00059	0.00066	0.00072	0.000120
0.085	0.00054	0.00060	0.00065	0.00071	0.000125
0.09	0.00059	0.00064	0.00068	0.00073	0.000133
0.1	0.00076	0.00080	0.00083	0.00087	0.000166
0.11	0.00098	0.00100	0.00103	0.00106	0.000197

Fuente: Autora.

En esta tabla se muestra la recopilación de resultados de los cálculos realizados en el frente de Pareto 3, para cada función objetivo, en donde para la FO1 los menores valores se encuentran en el rango de rugosidades entre 0.07 hasta 0.09, mientras que para la FO2 están entre 0.05 y 0.0825.



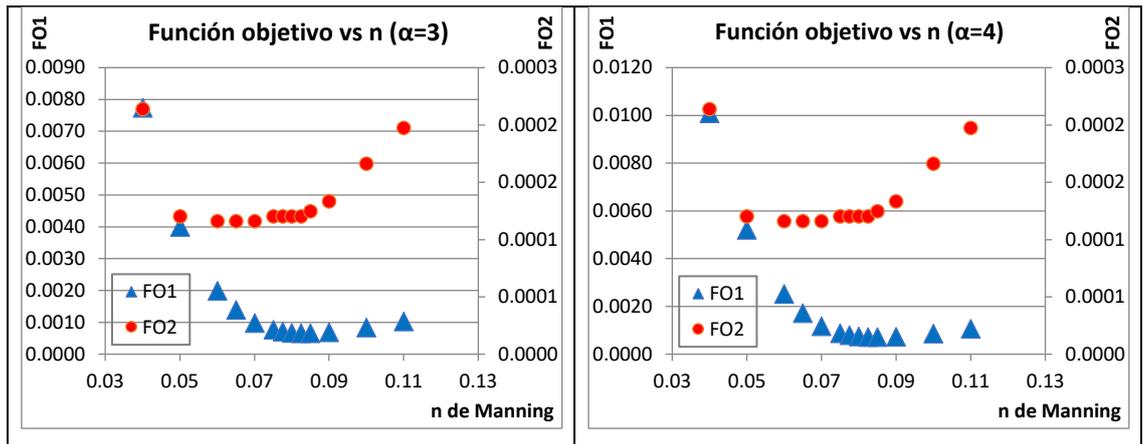


Figura 3.37: Función objetivo vs n de Manning,  $\alpha=1, 2, 3$  y  $4$ , error promedio, 9-12 marzo 2017.

Fuente: Autora.

En el análisis de las últimas 4 gráficas se puede observar que los valores de rugosidad con menor relación entre funciones objetivo estarán entre 0.07 y 0.09 para la FO1 y para la FO2 presenta los valores bajos desde 0.05.

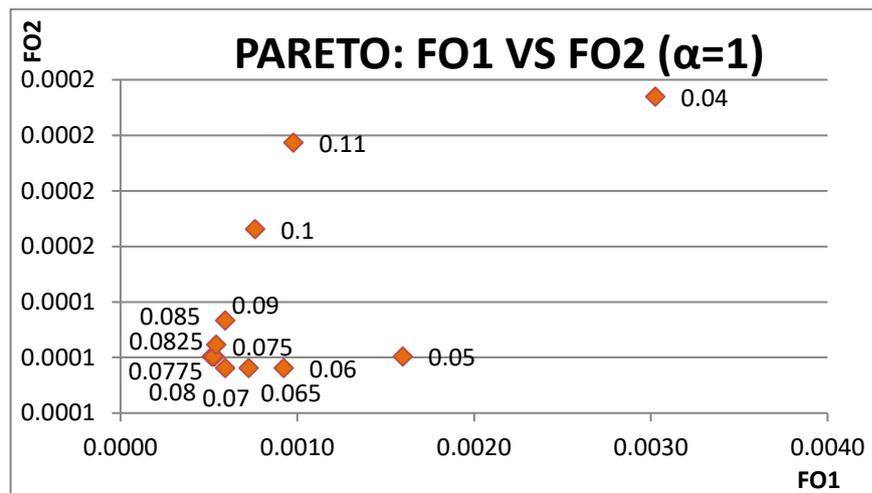


Figura 3.38: Función objetivo 1 vs función objetivo 2,  $\alpha=1$ , error promedio, 9-12 marzo 2017, con todos los valores de rugosidad.

Fuente: Autora.

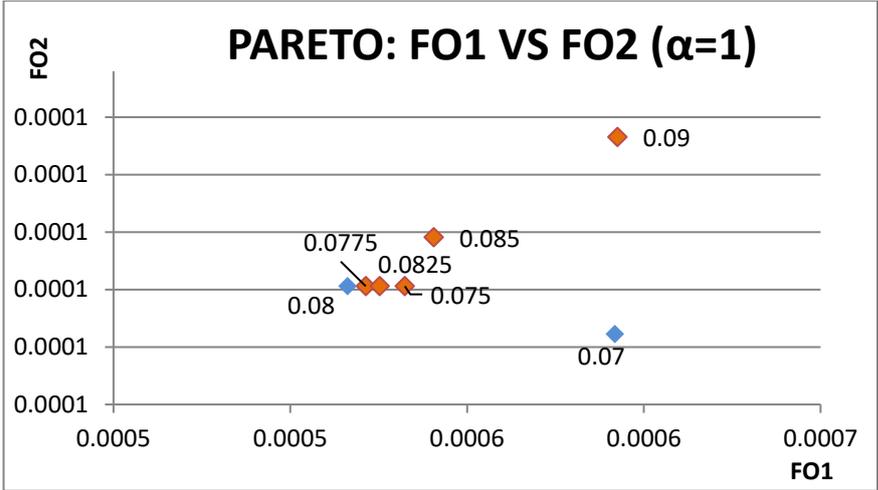


Figura 3.39: Función objetivo 1 vs función objetivo 2,  $\alpha=1$ , error promedio, 9-12 marzo 2017, valores de interés.

Fuente: Autora.

En esta figura se puede observar que las rugosidades con menor relación entre funciones objetivo son 0.07 y 0.08.

Estos valores son no dominados porque:

- FO1 de 0.08 < FO1 de 0.07, pero FO2 de 0.08 > FO2 de 0.07.

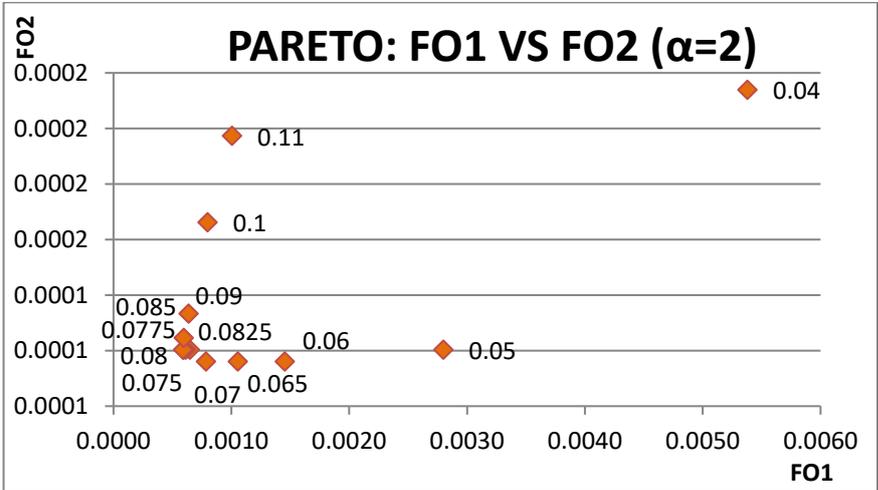


Figura 3.40: Función objetivo 1 vs función objetivo 2,  $\alpha=2$ , error promedio, 9-12 marzo 2017, con todos los valores de rugosidad.

Fuente: Autora.

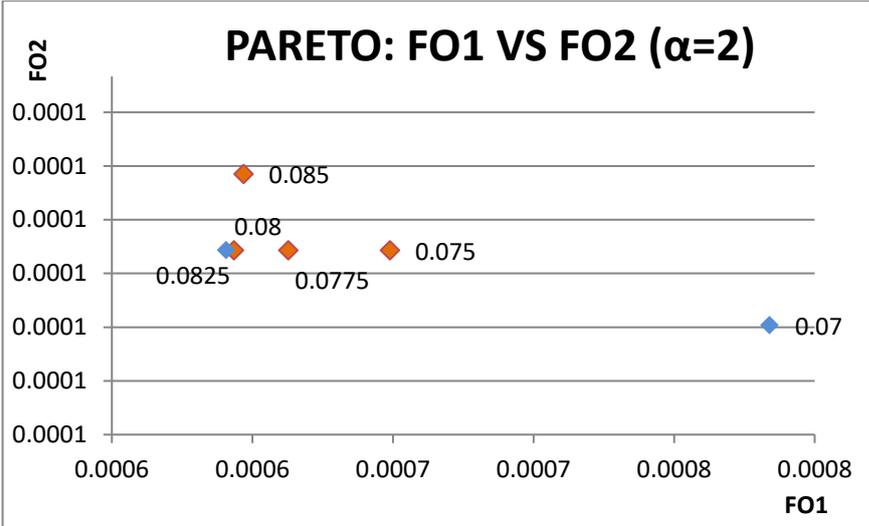


Figura 3.41: Función objetivo 1 vs función objetivo 2,  $\alpha=2$ , error promedio, 9-12 marzo 2017, valores de interés.

Fuente: Autora.

El valor de rugosidades con menor relación entre funciones objetivo son 0.07, y 0.0825.

Estos valores son no dominados porque:

- FO1 de 0.0825 < FO1 de 0.07, pero FO2 de 0.0825 > FO2 de 0.07.

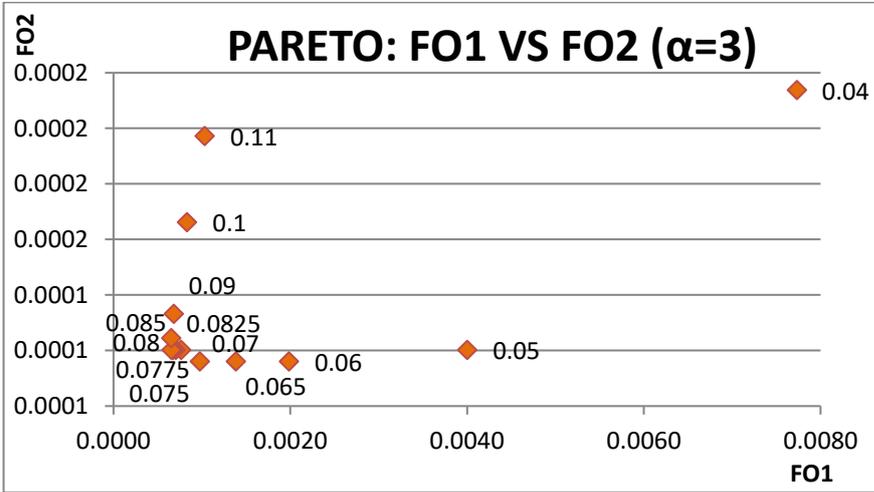


Figura 3.42: Función objetivo 1 vs función objetivo 2,  $\alpha=3$ , error promedio, 9-12 marzo 2017, con todos los valores de rugosidad.

Fuente: Autora.

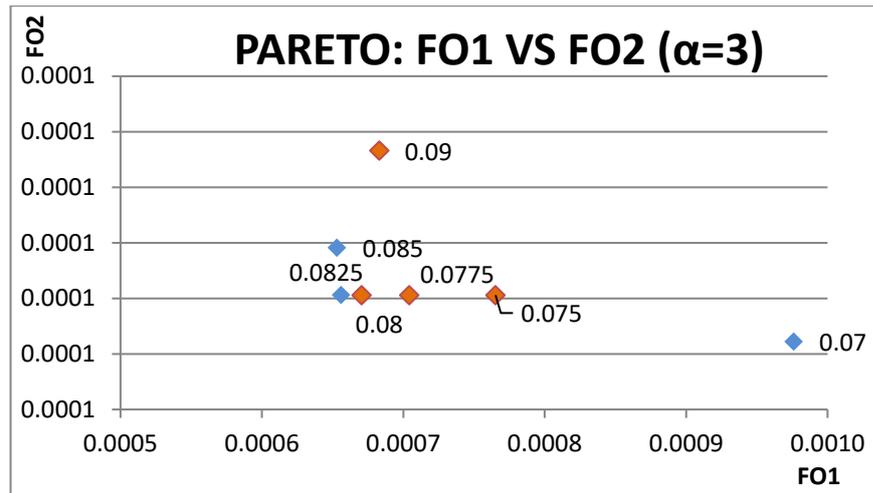


Figura 3.43: Función objetivo 1 vs función objetivo 2,  $\alpha=3$ , error promedio, 9-12 marzo 2017, valores de interés.

Fuente: Autora.

En esta gráfica se puede observar que el punto 0.07 es el menor con respecto a la función objetivo 2 sin embargo su valor en la función objetivo 1 es grande, por lo que las rugosidades que cumplen con la menor relación entre funciones objetivo son 0.07, 0.0825 y 0.085. Estos valores son no dominados porque:

- FO1 de 0.085 < FO1 de 0.0825, pero FO2 de 0.085 > FO2 de 0.0825.
- FO1 de 0.0825 < FO1 de 0.07, pero FO2 de 0.0825 > FO2 de 0.0775.

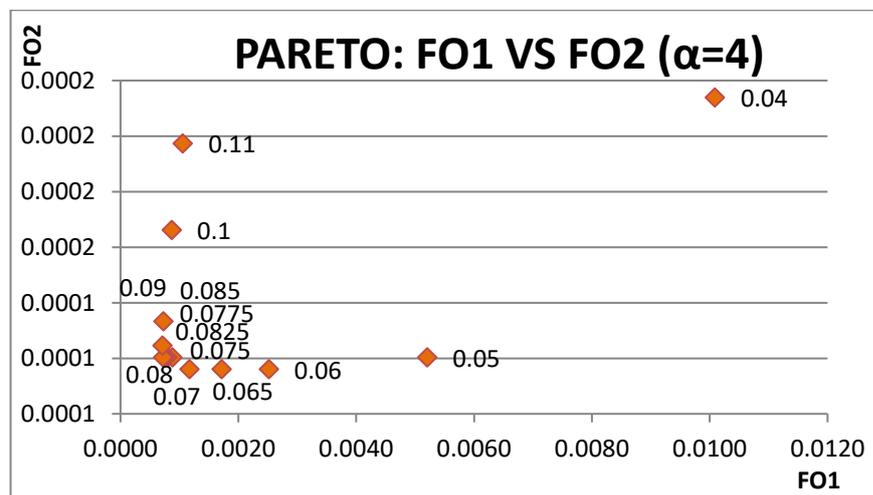


Figura 3.44: Función objetivo 1 vs función objetivo 2,  $\alpha=4$ , error promedio, 9-12 marzo 2017, con todos los valores de rugosidad.

Fuente: Autora.

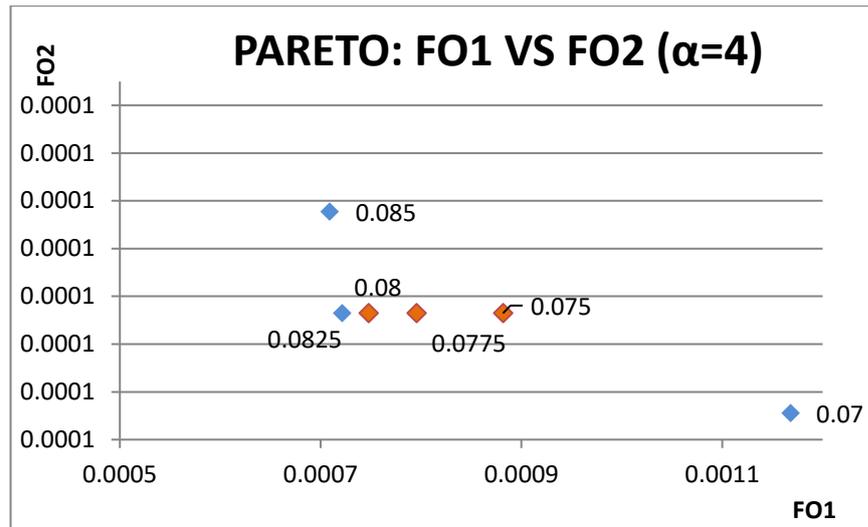


Figura 3.45: Función objetivo 1 vs función objetivo 2,  $\alpha=4$ , error promedio, 9-12 marzo 2017, valores de interés.

Fuente: Autora.

En la gráfica presentada al igual que la gráfica anterior no se considera la rugosidad de 0.07 por tener un valor elevando en la función objetivo 1, por lo que las rugosidades que cumple con la menor relación entre funciones son: 0.07, 0.0825 y 0.085.

Estos valores son no dominados porque:

- FO1 de 0.085 < FO1 de 0.0825, pero FO2 de 0.085 > FO2 de 0.0825.
- FO1 de 0.0825 < FO1 de 0.07, pero FO2 de 0.0825 > FO2 de 0.07.

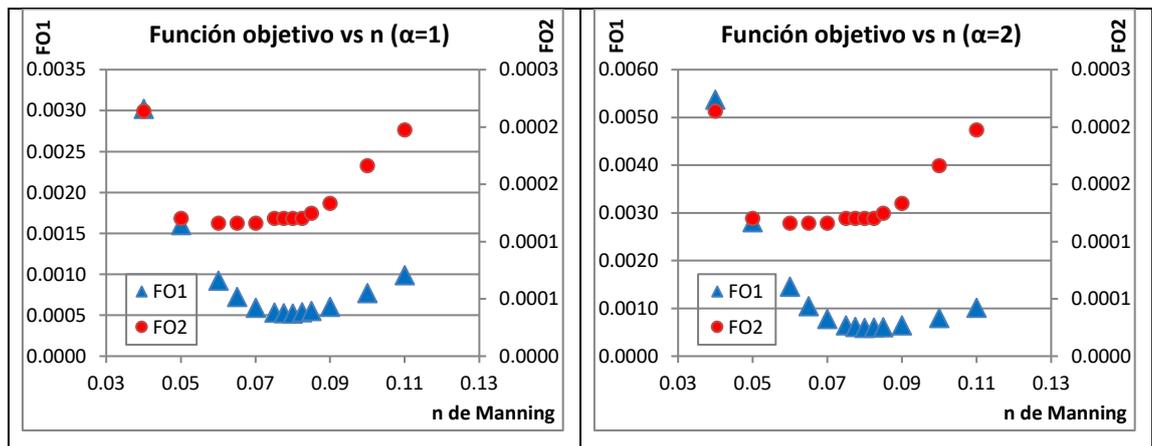
3.1.3.2. Error cuadrático

Tabla 3.8: Resumen frente de Pareto 3, error cuadrático, 9-12 marzo 2017.

n	FO1 para cada valor de $\alpha$				FO2
	1	2	3	4	
0.04	0.003020	0.005370	0.007720	0.01007	0.00021
0.05	0.001600	0.002806	0.004011	0.00522	0.00012
0.06	0.000923	0.001455	0.001986	0.00252	0.00012
0.065	0.000722	0.001049	0.001376	0.00170	0.00012
0.07	0.000590	0.000781	0.000971	0.00116	0.00012
0.075	0.000533	0.000645	0.000757	0.00087	0.00012
0.0775	0.000525	0.000613	0.000701	0.00079	0.00012
0.08	0.000520	0.000591	0.000662	0.00073	0.00012
0.0825	0.000537	0.000598	0.000659	0.00072	0.00012
0.085	0.000551	0.000604	0.000657	0.00071	0.00012
0.09	0.000602	0.000643	0.000685	0.00073	0.00013
0.1	0.000770	0.000801	0.000832	0.00086	0.00017
0.11	0.000989	0.001010	0.001032	0.00105	0.00020

Fuente: Autora.

En esta tabla se presentan los resultados de los cálculos realizados en el frente de Pareto 3, para cada función objetivo con el error cuadrático, la misma que muestra los menores valores para la FO1 entre las rugosidades de 0.07 y 0.085, mientras que para la FO2 estos valores se encuentran entre 0.05 y 0.085.



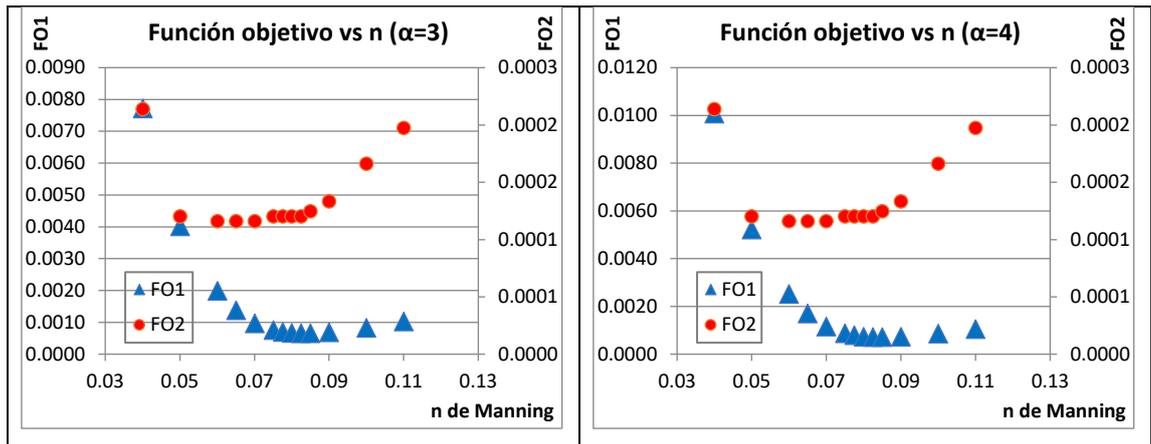


Figura 3.46: Función objetivo vs n de Manning,  $\alpha=1, 2, 3$  y  $4$ , error cuadrático, 9-12 marzo 2017.

Fuente: Autora.

En las últimas gráficas presentadas se observa que las rugosidades con menor relación en sus funciones objetivo se encuentran entre 0.07 y 0.09.

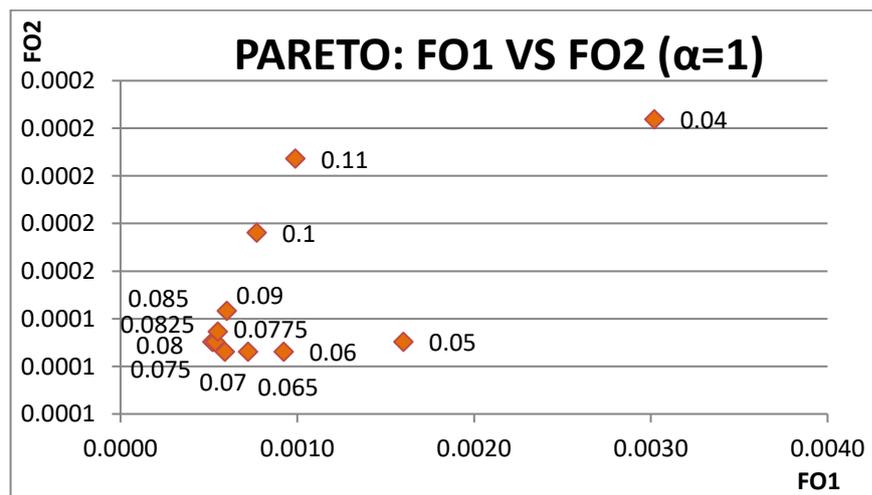


Figura 3.47: Función objetivo 1 vs función objetivo 2,  $\alpha=1$ , error cuadrático, 9-12 marzo 2017, con todos los valores de rugosidad.

Fuente: Autora.

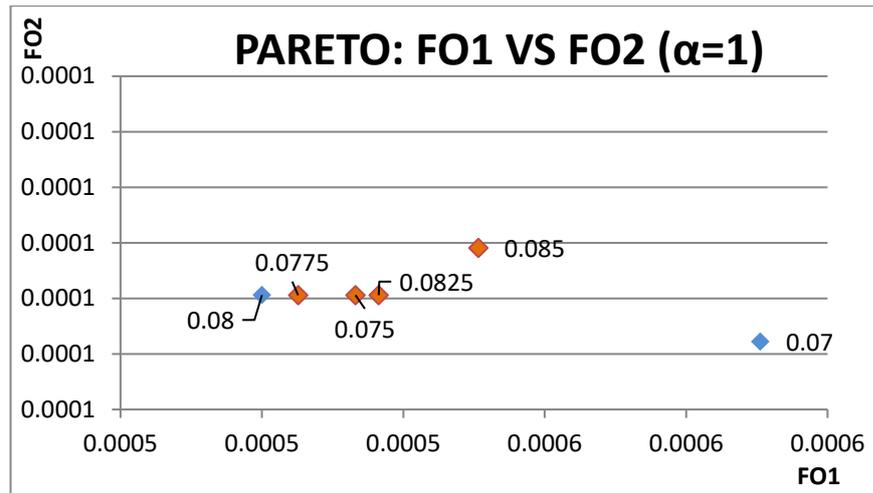


Figura 3.48: Función objetivo 1 vs función objetivo 2,  $\alpha=1$ , error cuadrático, 9-12 marzo 2017, valores de interés.

Fuente: Autora.

En esta gráfica se puede observar que el valor de rugosidades con menor relación en las funciones objetivo son 0.07 y 0.08.

Estos valores son no dominados porque:

- FO1 de 0.08 < FO1 de 0.07, pero FO2 de 0.08 > FO2 de 0.07.

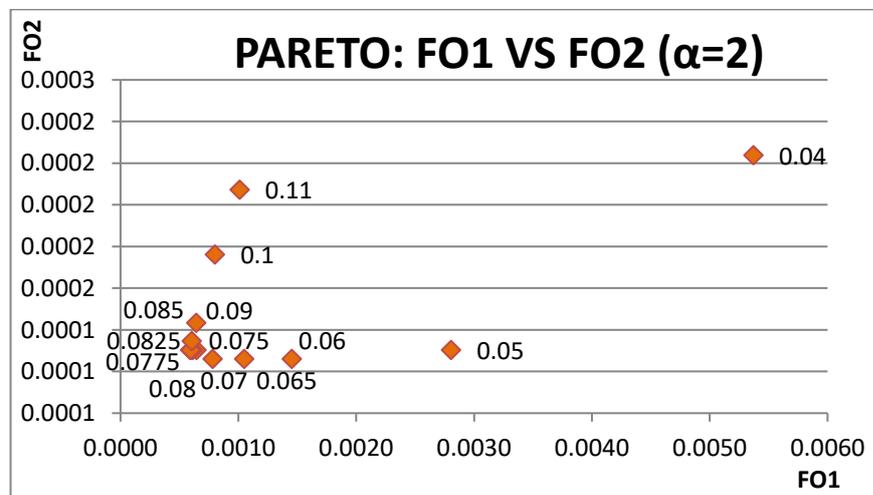


Figura 3.49: Función objetivo 1 vs función objetivo 2,  $\alpha=2$ , error cuadrático, 9-12 marzo 2017, con todos los valores de rugosidad.

Fuente: Autora.

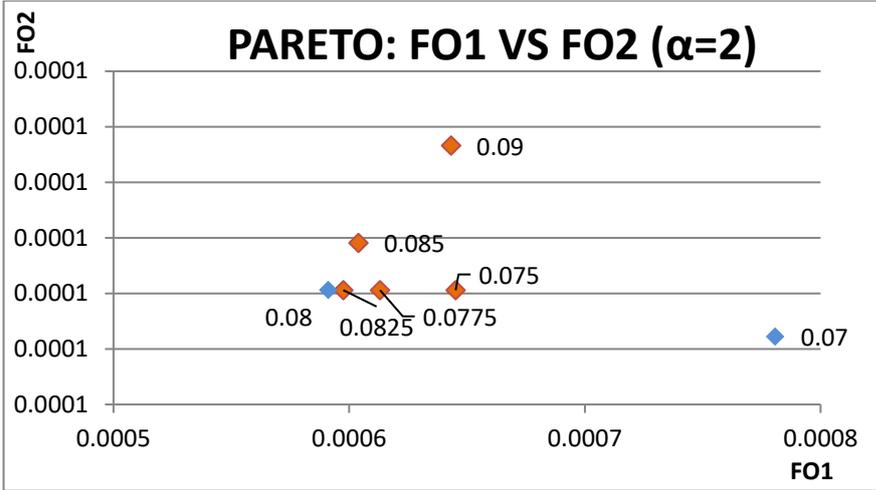


Figura 3.50: Función objetivo 1 vs función objetivo 2,  $\alpha=2$ , error cuadrático, 9-12 marzo 2017, valores de interés.

Fuente: Autora.

En la gráfica presentada se observa que las rugosidades con menor relación entre sus funciones objetivo son 0.07 y 0.08.

Estos valores son no dominados porque:

- FO1 de 0.08 < FO1 de 0.07, pero FO2 de 0.08 > FO2 de 0.07.

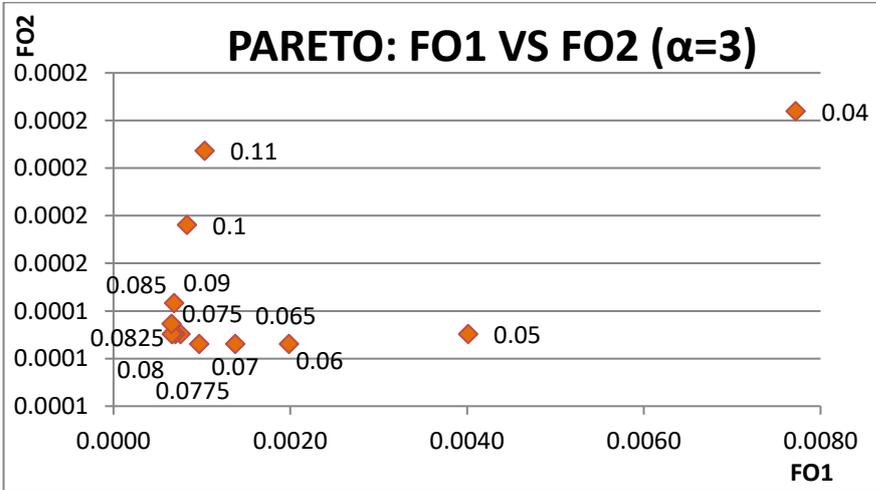


Figura 3.51: Función objetivo 1 vs función objetivo 2,  $\alpha=3$ , error cuadrático, 9-12 marzo 2017, con todos los valores de rugosidad.

Fuente: Autora.

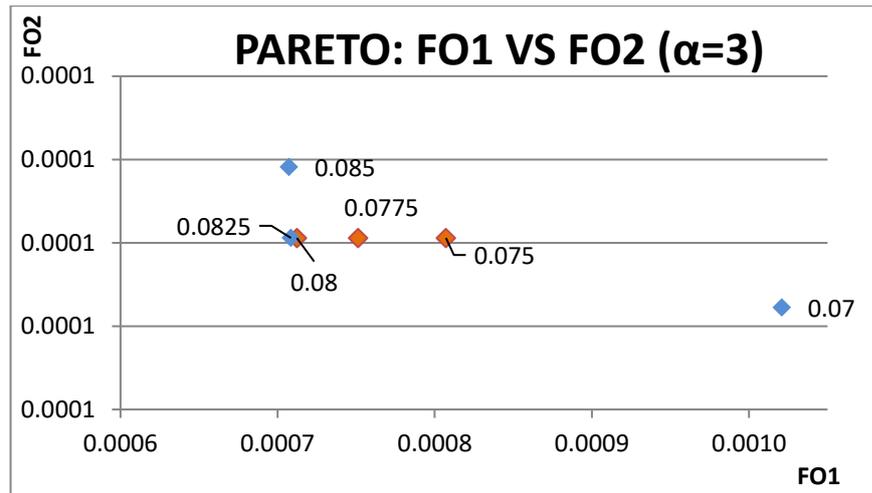


Figura 3.52: Función objetivo 1 vs función objetivo 2,  $\alpha=3$ , error cuadrático, 9-12 marzo 2017, valores de interés.

Fuente: Autora.

Dentro de esta gráfica se puede observar que existen valores de rugosidad con un menor valor de función objetivo 2, sin embargo, no se mantiene que la relación de las dos funciones objetivo sean las menores por lo que las rugosidades que poseen esta característica son: 0.07, 0.0825 y 0.085. Son no dominados porque:

- FO1 de 0.085 < FO1 de 0.0825, pero FO2 de 0.085 > FO2 de 0.0825.
- FO1 de 0.0825 < FO1 de 0.07, pero FO2 de 0.0825 > FO2 de 0.07.

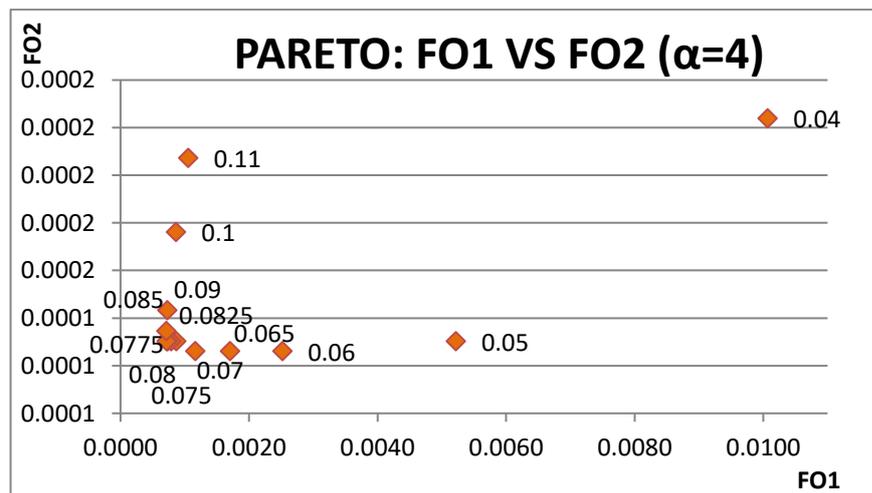


Figura 3.53: Función objetivo 1 vs función objetivo 2,  $\alpha=4$ , error cuadrático, 9-12 marzo 2017, con todos los valores de rugosidad.

Fuente: Autora.

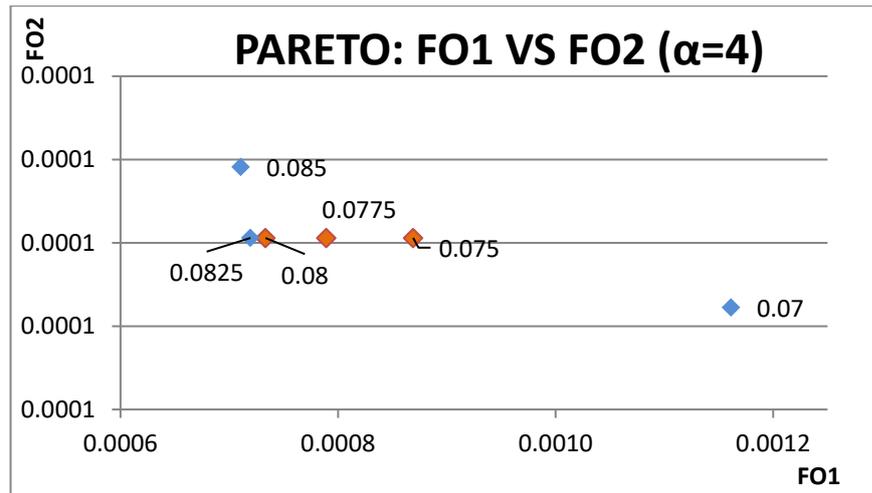


Figura 3.54: Función objetivo 1 vs función objetivo 2,  $\alpha=4$ , error cuadrático, 9-12 marzo 2017, valores de interés.

Fuente: Autora.

En la última gráfica presentada se puede observar que los valores con menor relación entre funciones objetivo son: 0.07, 0.0825 y 0.085.

Estos valores son no dominados porque:

- FO1 de 0.085 < FO1 de 0.0825, pero FO2 de 0.085 > FO2 de 0.0825.
- FO1 de 0.0825 < FO1 de 0.07, pero FO2 de 0.0825 > FO2 de 0.07.

A continuación, se presenta la recopilación de los valores no dominados para el frente de Pareto 3 que varía desde 0.07 hasta 0.085, teniendo un promedio de 0.078.

Tabla 3.9: Resumen valores no dominados, frente de Pareto 3, 9-12 marzo 2017.

Valor de $\alpha$	Método de evaluación del error del HEC-RAS	
	Error promedio	Error cuadrático
1	0.07	0.07
	0.08	0.08
2	0.07	0.07
	0.0825	0.08
3	0.07	0.07
	0.0825	0.0825
	0.085	0.085
4	0.07	0.07
	0.0825	0.0825
	0.085	0.085

Fuente: Autora.

### 3.2. Evento del 12 - 14 abril 2017

#### 3.2.1. Frente de Pareto 1

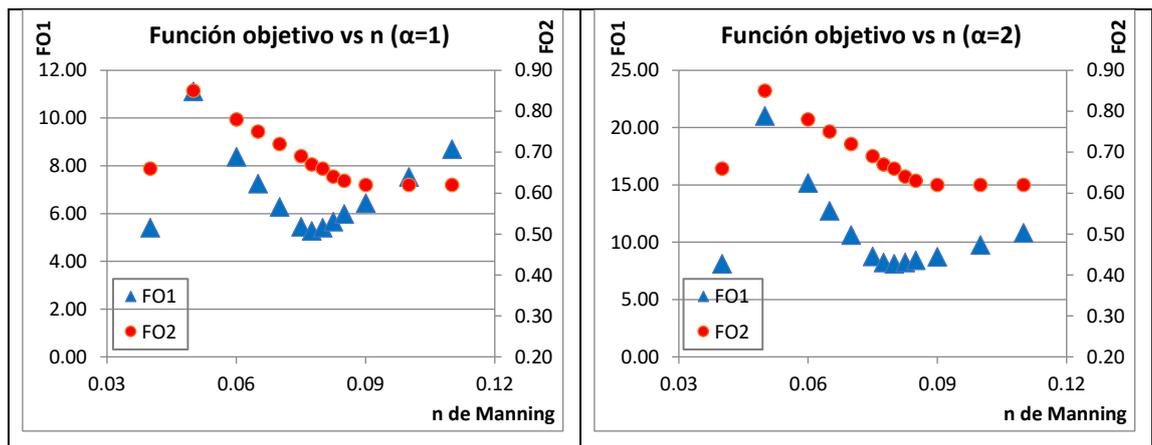
##### 3.2.1.1. Error promedio

Tabla 3.10: Resumen frente de Pareto 1, error promedio, 12-14 abril 2017

n	FO1 para cada valor de $\alpha$				FO2
	1	2	3	4	
0.04	5.40	8.12	10.84	13.56	0.66
0.05	11.11	21.01	30.91	40.81	0.85
0.06	8.37	15.17	21.97	28.77	0.78
0.065	7.25	12.75	18.25	23.75	0.75
0.07	6.28	10.63	14.98	19.33	0.72
0.075	5.45	8.76	12.07	15.38	0.69
0.0775	5.27	8.22	11.17	14.12	0.67
0.08	5.40	8.12	10.84	13.56	0.66
0.0825	5.66	8.22	10.78	13.34	0.64
0.085	5.98	8.42	10.86	13.30	0.63
0.09	6.43	8.73	11.03	13.33	0.62
0.1	7.53	9.76	11.99	14.22	0.62
0.11	8.69	10.82	12.95	15.08	0.62

Fuente: Autora.

En la presente tabla se muestra la compilación de resultados de los cálculos del frente de Pareto 1, con cada función objetivo, mostrando para la FO1 los menores valores en el rango de rugosidades de 0.075 a 0.09, y que para la FO2 entre 0.07 y 0.11.



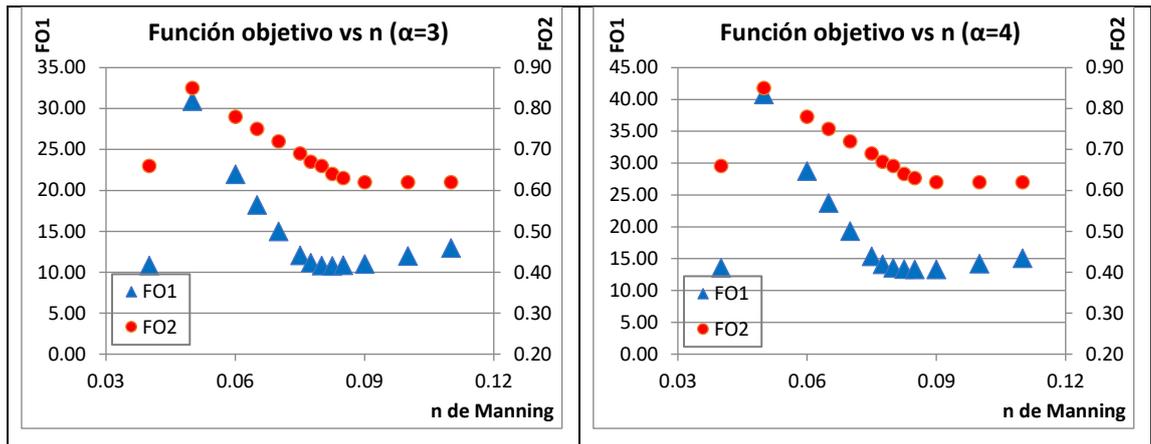


Figura 3.55: Función objetivo vs n de Manning,  $\alpha=1, 2, 3$  y 4, error promedio, 12-14 abril 2017.

Fuente: Autora.

En las 4 gráficas presentadas anteriormente, se observar que en todas ellas el valor de rugosidad con menor relación entre funciones objetivo se va a encontrar entre 0.07 y 0.09.

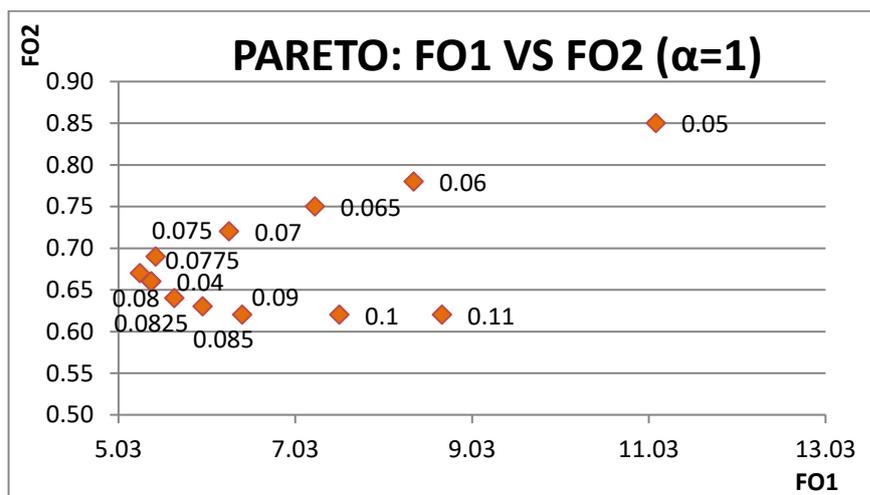


Figura 3.56: Función objetivo 1 vs función objetivo 2,  $\alpha=1$ , error promedio, 12-14 abril 2017, con todos los valores de rugosidad.

Fuente: Autora.

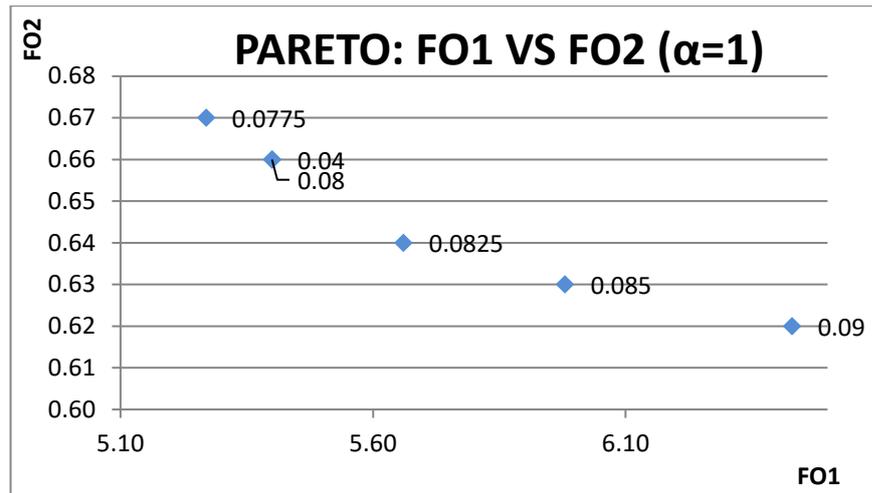


Figura 3.57: Función objetivo 1 vs función objetivo 2,  $\alpha=1$ , error promedio, 12-14 abril 2017, valores de interés.

Fuente: Autora.

En esta gráfica los valores de rugosidad con menor relación entre funciones objetivo son 0.0775, 0.08, 0.0825, 0.085 y 0.09.

Estos valores son no dominados porque:

- FO1 de 0.0775 < FO1 de 0.08, pero FO2 de 0.0775 > FO2 de 0.08.
- FO1 de 0.08 < FO1 de 0.0825, pero FO2 de 0.08 > FO2 de 0.0825.
- FO1 de 0.0825 < FO1 de 0.085, pero FO2 de 0.0825 > FO2 de 0.085.
- FO1 de 0.085 < FO1 de 0.09, pero FO2 de 0.085 > FO2 de 0.09.

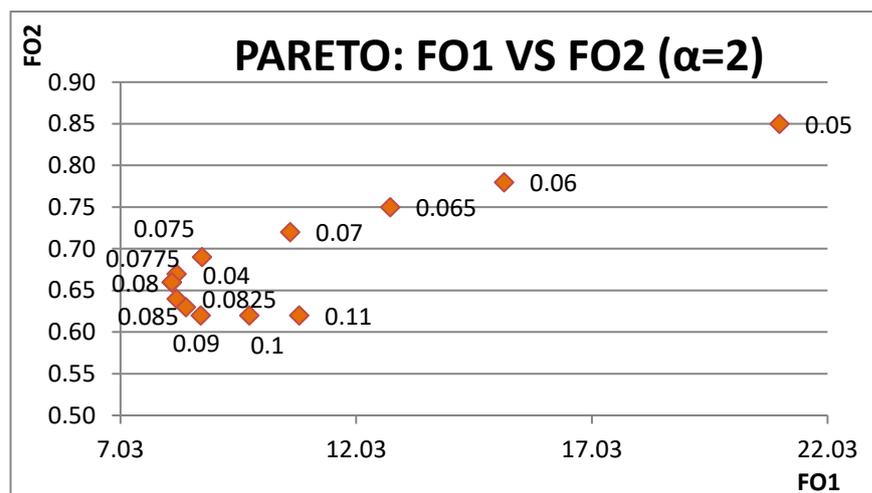


Figura 3.58: Función objetivo 1 vs función objetivo 2,  $\alpha=2$ , error promedio, 12-14 abril 2017, con todos los valores de rugosidad.

Fuente: Autora.

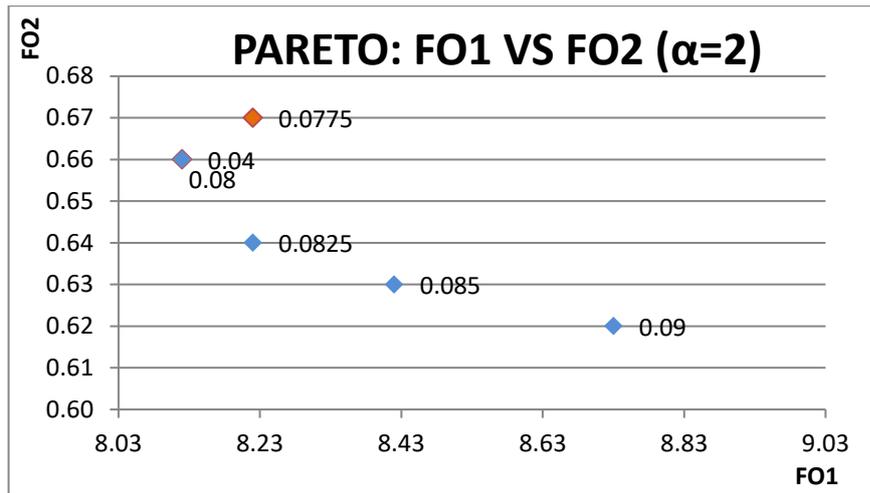


Figura 3.59: Función objetivo 1 vs función objetivo 2,  $\alpha=2$ , error promedio, 12-14 abril 2017, valores de interés.

Fuente: Autora.

En esta figura se muestra los valores de rugosidad con menor relación entre sus funciones objetivo, y estos son 0.08, 0.0825, 0.085 y 0.09.

Estos valores son no dominados porque:

- FO1 de 0.08 < FO1 de 0.0825, pero FO2 de 0.08 > FO2 de 0.0825.
- FO1 de 0.0825 < FO1 de 0.085, pero FO2 de 0.0825 > FO2 de 0.085.
- FO1 de 0.085 < FO1 de 0.09, pero FO2 de 0.085 > FO2 de 0.09.

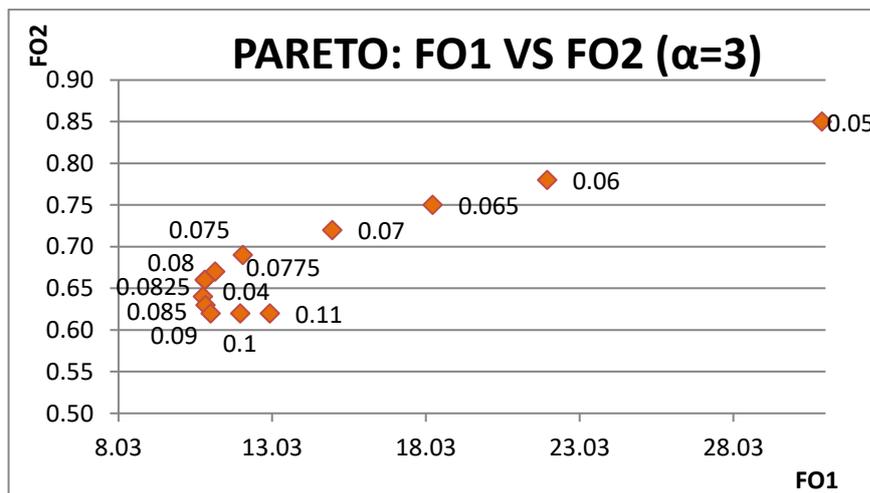


Figura 3.60: Función objetivo 1 vs función objetivo 2,  $\alpha=3$ , error promedio, 12-14 abril 2017, con todos los valores de rugosidad.

Fuente: Autora.

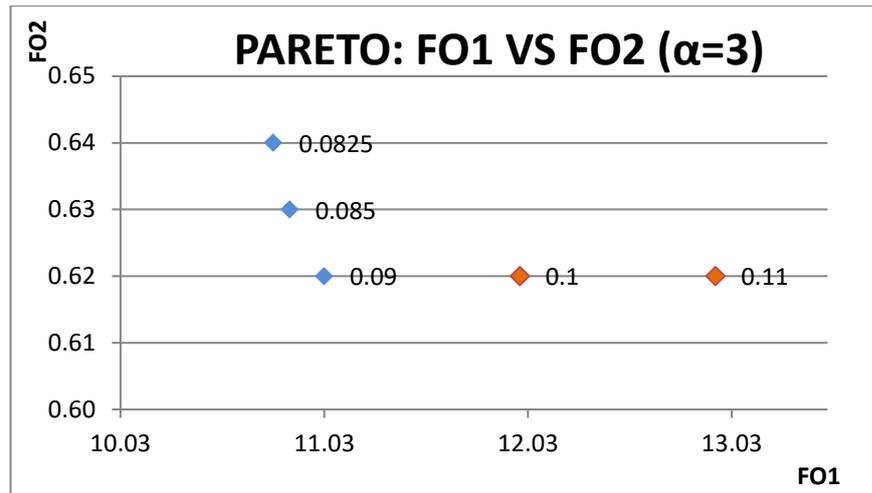


Figura 3.61: Función objetivo 1 vs función objetivo 2,  $\alpha=3$ , error promedio, 12-14 abril 2017, valores de interés.

Fuente: Autora.

En la presente gráfica se muestran las rugosidades con menor relación entre funciones objetivo y estas son 0.0825, 0.085 y 0.09.

Estos valores son no dominados porque:

- FO1 de 0.0825 < FO1 de 0.085, pero FO2 de 0.0825 > FO2 de 0.085.
- FO1 de 0.085 < FO1 de 0.09, pero FO2 de 0.085 > FO2 de 0.09.

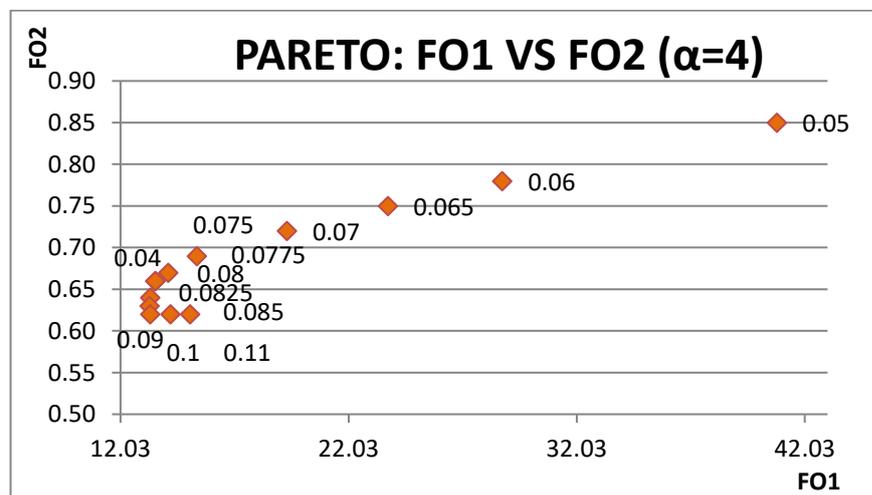


Figura 3.62: Función objetivo 1 vs función objetivo 2,  $\alpha=4$ , error promedio, 12-14 abril 2017, con todos los valores de rugosidad.

Fuente: Autora.

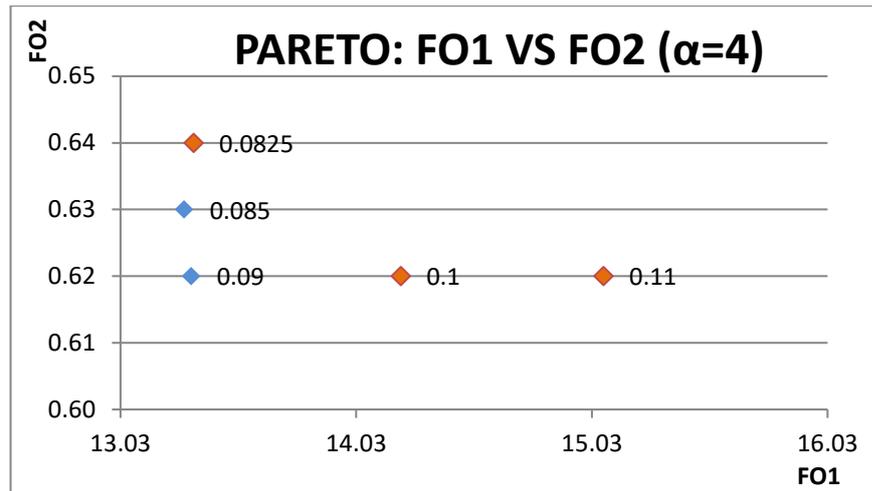


Figura 3.63: Función objetivo 1 vs función objetivo 2,  $\alpha=4$ , error promedio, 12-14 abril 2017, valores de interés.

Fuente: Autora.

En esta última gráfica se puede diferenciar claramente que los valores de rugosidad con menor relación entre sus funciones objetivo son 0.085 y 0.09.

Estos valores son no dominados porque:

- FO1 de 0.085 < FO1 de 0.09, pero FO2 de 0.085 > FO2 de 0.09.

### 3.2.1.2. Error cuadrático

Tabla 3.11: Resumen frente de Pareto 1, error cuadrático, 12-14 abril 2017

n	FO1 para cada valor de $\alpha$				FO2
	1	2	3	4	
0.04	16.09	29.84	43.59	57.34	0.93
0.05	11.27	21.20	31.13	41.06	0.85
0.06	8.73	15.55	22.37	29.19	0.78
0.065	7.72	13.09	18.46	23.83	0.75
0.07	6.71	10.87	15.03	19.19	0.72
0.075	5.85	8.96	12.07	15.18	0.69
0.0775	5.72	8.52	11.32	14.12	0.67
0.08	5.89	8.46	11.03	13.60	0.66
0.0825	6.23	8.66	11.09	13.52	0.64
0.085	6.41	8.72	11.03	13.34	0.63
0.09	7.18	9.31	11.44	13.57	0.60
0.1	7.18	9.31	11.44	13.57	0.60
0.11	10.40	12.22	14.04	15.86	0.56

Fuente: Autora.

En esta tabla se muestra una recopilación de los resultados de los cálculos realizados para el frente de Pareto 1, para cada función objetivo con el error cuadrático, mostrando para la FO1 los menores valores para las rugosidades entre 0.075 a 0.11, y para la FO2 entre 0.09 y 0.11.

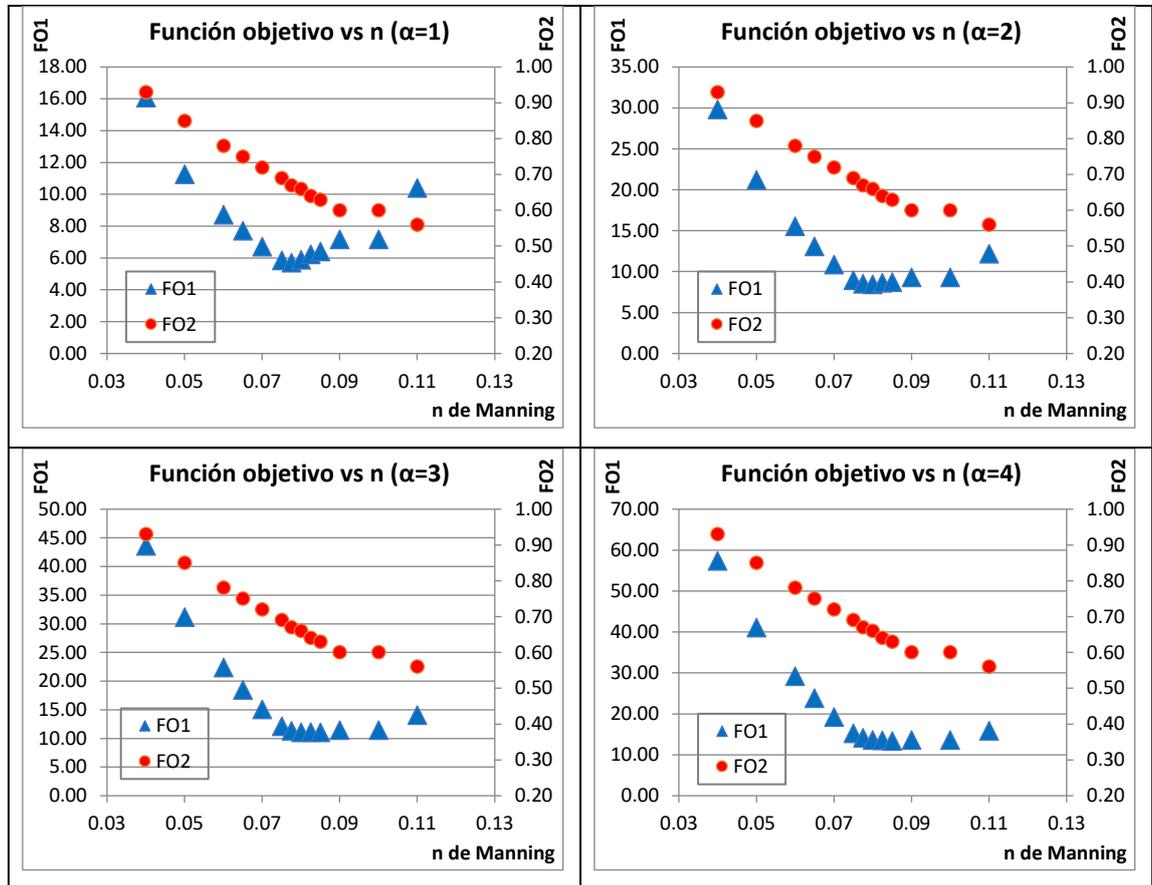


Figura 3.64: Función objetivo vs n de Manning,  $\alpha=1, 2, 3$  y  $4$ , error cuadrático, 12-14 abril 2017.

Fuente: Autora.

En las 4 gráficas realizadas se diferencia claramente que la concavidad de las curvas, que me indica el menor valor de ambas funciones objetivo, se encuentra entre los valores de 0.07 y 0.11.

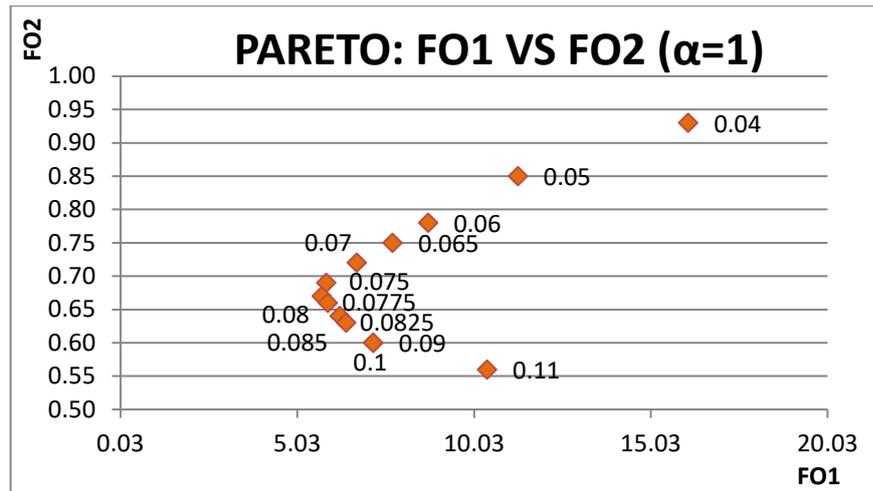


Figura 3.65: Función objetivo 1 vs función objetivo 2,  $\alpha=1$ , error cuadrático, 12-14 abril 2017, con todos los valores de rugosidad.

Fuente: Autora.

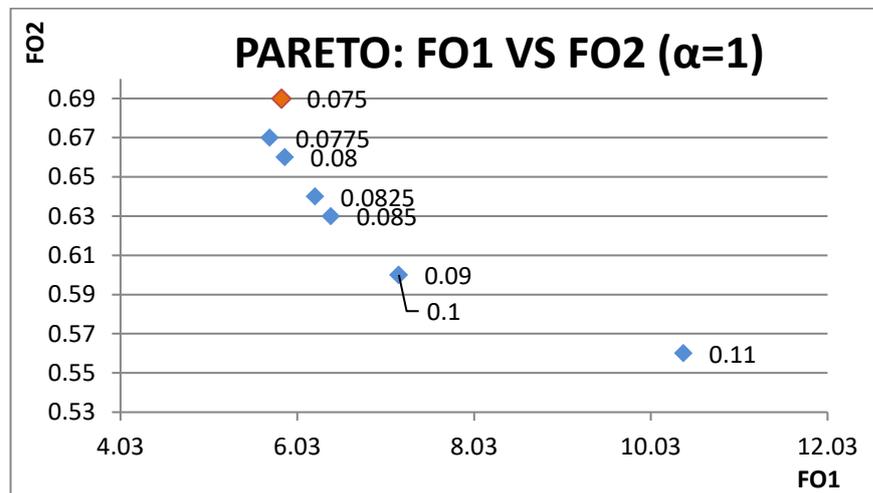


Figura 3.66: Función objetivo 1 vs función objetivo 2,  $\alpha=1$ , error cuadrático, 12-14 abril 2017, valores de interés.

Fuente: Autora.

De acuerdo a las gráficas analizadas en el punto anterior las rugosidades con menor relación entre sus funciones objetivo son 0.0775, 0.08, 0.0825, 0.085, 0.09- 0.10 y 0.11.

Estos valores son no dominados porque:

- FO1 de 0.0775 < FO1 de 0.08, pero FO2 de 0.0775 > FO2 de 0.08.
- FO1 de 0.08 < FO1 de 0.0825, pero FO2 de 0.08 > FO2 de 0.0825.
- FO1 de 0.0825 < FO1 de 0.085, pero FO2 de 0.0825 > FO2 de 0.085.
- FO1 de 0.085 < FO1 de 0.09, 0.10, pero FO2 de 0.085 > FO2 de 0.09, 0.10.
- FO1 de 0.09, 0.10 < FO1 de 0.11, pero FO2 de 0.09, 0.10 > FO2 de 0.11.

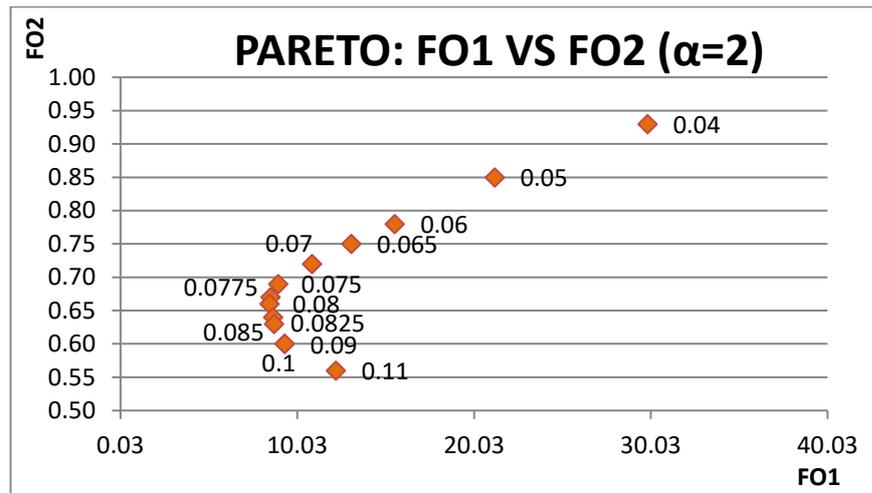


Figura 3.67: Función objetivo 1 vs función objetivo 2,  $\alpha=2$ , error cuadrático, 12-14 abril 2017, con todos los valores de rugosidad.

Fuente: Autora.

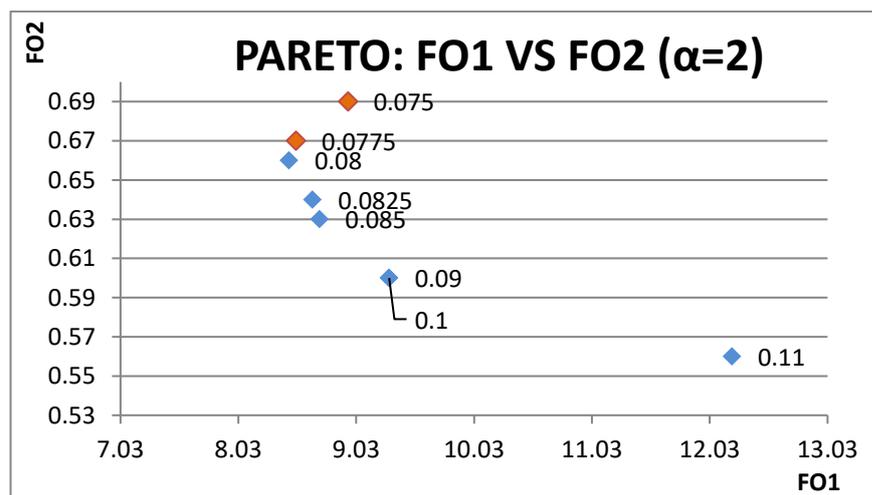


Figura 3.68: Función objetivo 1 vs función objetivo 2,  $\alpha=2$ , error cuadrático, 12-14 abril 2017, valores de interés.

Fuente: Autora.

Dentro de esta figura se observa que las rugosidades con menor relación entre sus funciones objetivo son 0.08, 0.0825, 0.085, 0.09-0.10 y 0.11.

Estos valores son no dominados porque:

- FO1 de 0.08 < FO1 de 0.0825, pero FO2 de 0.08 > FO2 de 0.0825.
- FO1 de 0.0825 < FO1 de 0.085, pero FO2 de 0.0825 > FO2 de 0.085.
- FO1 de 0.085 < FO1 de 0.09, 0.10, pero FO2 de 0.085 > FO2 de 0.09, 0.10.
- FO1 de 0.09, 0.10 < FO1 de 0.11, pero FO2 de 0.09, 0.10 > FO2 de 0.11.

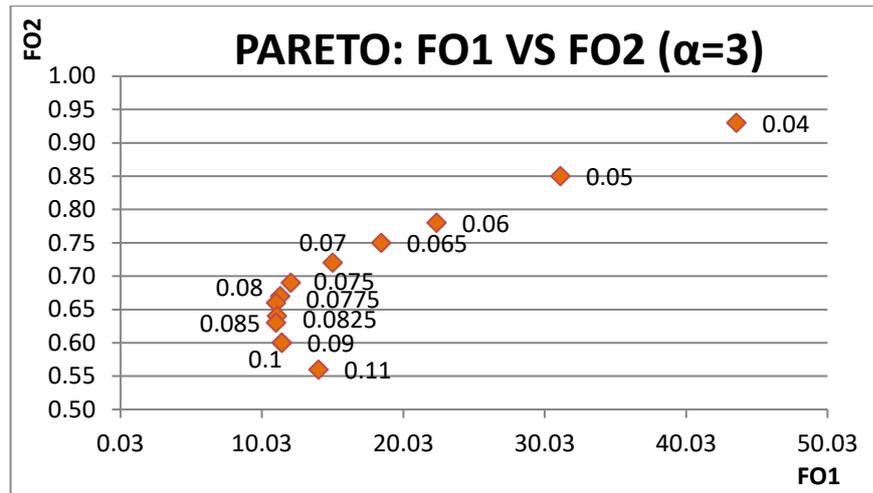


Figura 3.69: Función objetivo 1 vs función objetivo 2,  $\alpha=3$ , error cuadrático, 12-14 abril 2017, con todos los valores de rugosidad.

Fuente: Autora.

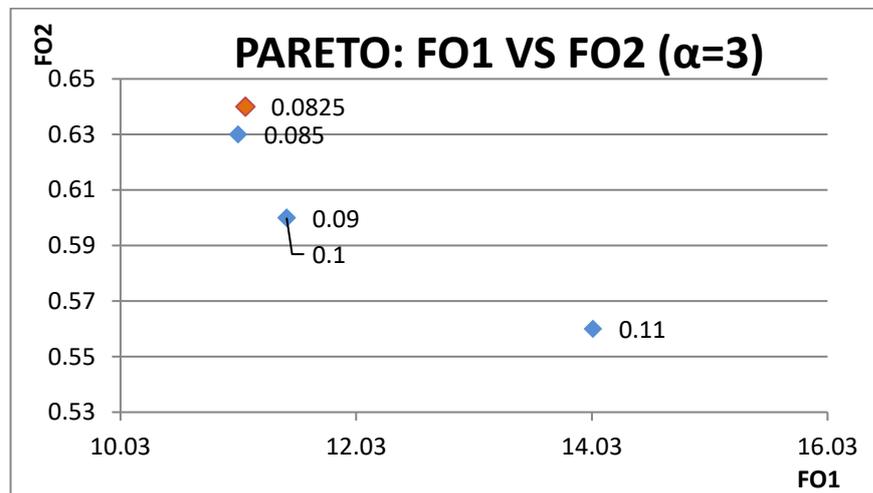


Figura 3.70: Función objetivo 1 vs función objetivo 2,  $\alpha=3$ , error cuadrático, 12-14 abril 2017, valores de interés.

Fuente: Autora.

En esta gráfica se aplica el mismo concepto que en gráficas anteriores por lo que las rugosidades con menor relación entre sus funciones objetivo son 0.085, 0.09-0.10 y 0.11.

Estos valores son no dominados porque:

- FO1 de 0.085 < FO1 de 0.09, 0.10, pero FO2 de 0.085 > FO2 de 0.09, 0.10.
- FO1 de 0.09, 0.10 < FO1 de 0.11, pero FO2 de 0.09, 0.10 > FO2 de 0.11.

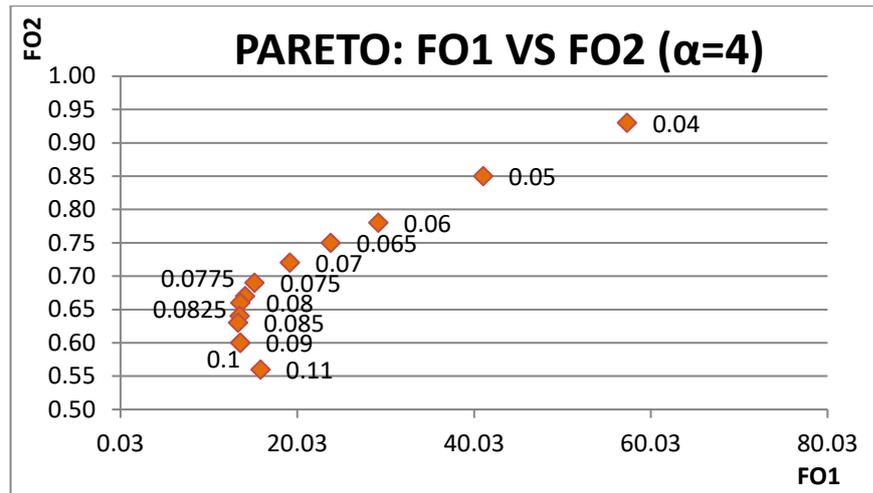


Figura 3.71: Función objetivo 1 vs función objetivo 2,  $\alpha=4$ , error cuadrático, 12-14 abril 2017, con todos los valores de rugosidad.

Fuente: Autora.

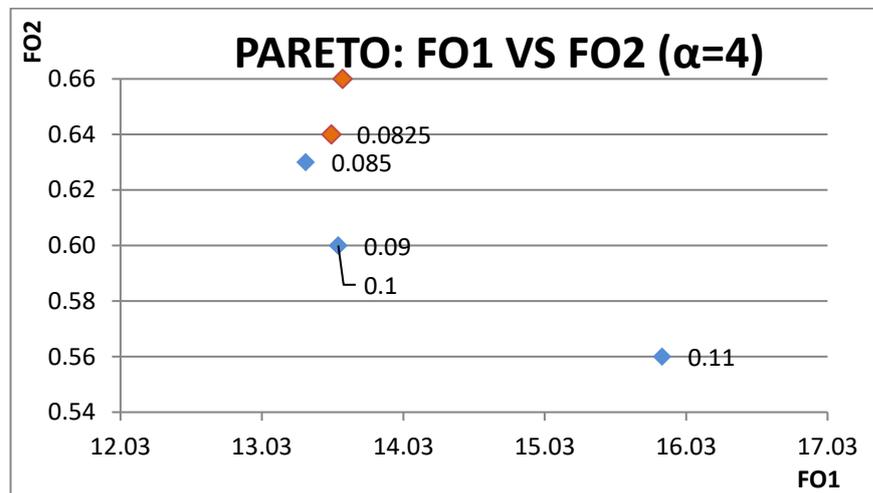


Figura 3.72: Función objetivo 1 vs función objetivo 2,  $\alpha=4$ , error cuadrático, 12-14 abril 2017, valores de interés.

Fuente: Autora.

En esta última gráfica se muestra que las rugosidades con menor relación entre funciones objetivo son 0.085, 0.09-0.10 y 0.11.

Estos valores son no dominados porque:

- FO1 de 0.085 < FO1 de 0.09, 0.10, pero FO2 de 0.085 > FO2 de 0.09, 0.10.
- FO1 de 0.09, 0.10 < FO1 de 0.11, pero FO2 de 0.09, 0.10 > FO2 de 0.11.

A continuación, se muestra la recopilación de los valores no dominados para cada uno de los errores, los cuales varían para este frente de Pareto entre 0.0775 y 0.11, teniendo un promedio de 0.089.

Tabla 3.12: Resumen valores no dominados, frente de Pareto 1, 12-14 abril 2017.

Valor de $\alpha$	Método de evaluación del error del HEC-RAS	
	Error promedio	Error cuadrático
1	0.0775	0.0775
	0.08	0.08
	0.0825	0.0825
	0.085	0.085
	0.09	0.09-0.10
2	0.08	0.08
	0.0825	0.0825
	0.085	0.085
	0.09	0.09-0.10
	0.11	0.11
3	0.0825	0.085
	0.085	0.09-0.10
	0.09	0.11
4	0.085	0.085
	0.09	0.09-0.10
		0.11

Fuente: Autora.

### 3.2.2. Frente de Pareto 2

#### 3.2.2.1. Error promedio

Tabla 3.13: Resumen frente de Pareto 2, error promedio, 12-14 abril 2017

n	FO1 para cada valor de $\alpha$				FO2
	1	2	3	4	
0.04	0.086	0.129	0.172	0.215	0.660
0.05	0.176	0.333	0.491	0.648	0.850
0.06	0.133	0.241	0.349	0.457	0.780
0.065	0.115	0.202	0.290	0.377	0.750
0.07	0.100	0.169	0.238	0.307	0.720
0.075	0.087	0.139	0.192	0.244	0.690
0.0775	0.084	0.130	0.177	0.224	0.670
0.08	0.086	0.129	0.172	0.215	0.660
0.0825	0.090	0.130	0.171	0.212	0.640
0.085	0.095	0.134	0.172	0.211	0.630
0.09	0.102	0.139	0.175	0.212	0.620
0.1	0.120	0.155	0.190	0.226	0.620
0.11	0.138	0.172	0.206	0.239	0.620

Fuente: Autora.

En esta tabla se presenta un resumen de los cálculos obtenidos del frente de Pareto 2 con cada una de las funciones objetivo, que muestra para la FO1 los menores valores entre las rugosidades de 0.075 a 0.09 y para la FO2 entre 0.08 y 0.11.

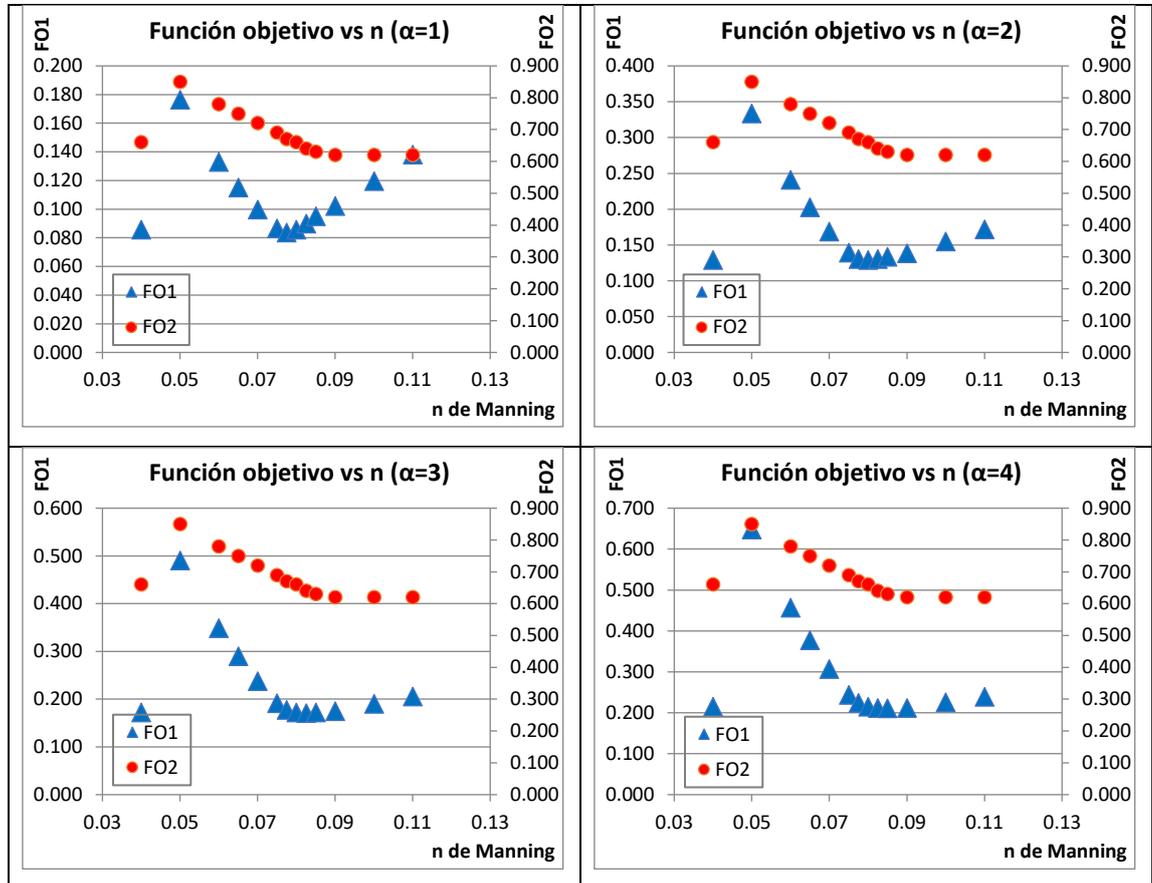


Figura 3.73: Función objetivo vs n de Manning,  $\alpha=1, 2, 3$  y 4, error promedio, 12-14 abril 2017.

Fuente: Autora.

Dentro de las últimas gráficas se puede observar que los valores de rugosidad que van a tener las menores relaciones entre sus funciones objetivo están entre los valores de 0.07 a 0.09.

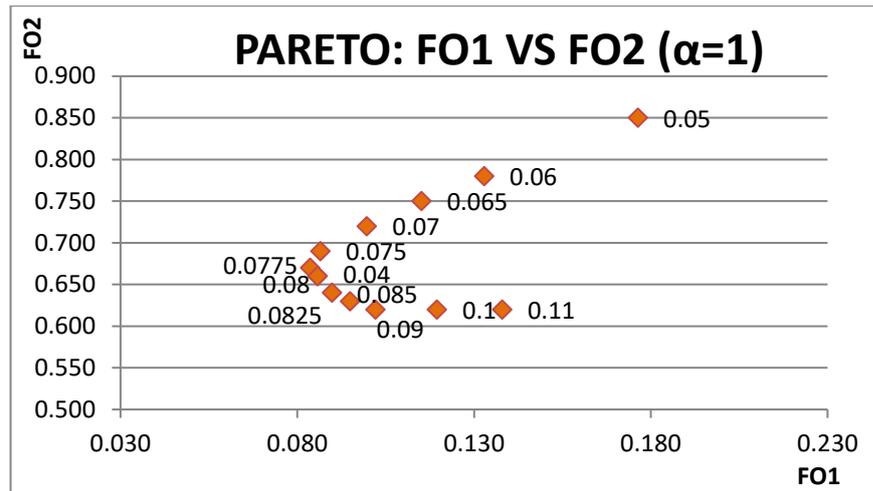


Figura 3.74: Función objetivo 1 vs función objetivo 2,  $\alpha=1$ , error promedio, 12-14 abril 2017, con todos los valores de rugosidad.

Fuente: Autora.

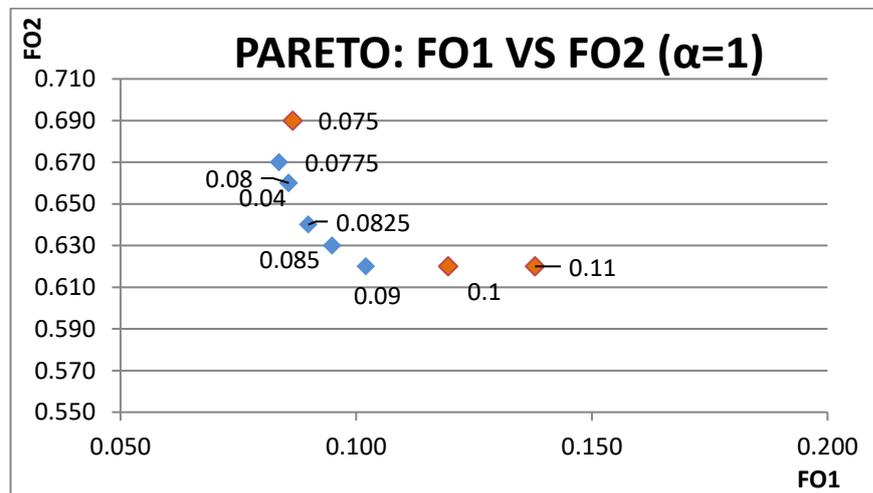


Figura 3.75: Función objetivo 1 vs función objetivo 2,  $\alpha=1$ , error promedio, 12-14 abril 2017, valores de interés.

Fuente: Autora.

En la presente gráfica se muestra que los valores de rugosidades con menor relación entre funciones objetivo son 0.0775, 0.08, 0.0825, 0.085 y 0.09.

Estos valores son no dominados porque:

- FO1 de 0.0775 < FO1 de 0.08, pero FO2 de 0.0775 > FO2 de 0.08.
- FO1 de 0.08 < FO1 de 0.0825, pero FO2 de 0.08 > FO2 de 0.0825.
- FO1 de 0.0825 < FO1 de 0.085, pero FO2 de 0.0825 > FO2 de 0.085.
- FO1 de 0.085 < FO1 de 0.09, pero FO2 de 0.085 > FO2 de 0.09.

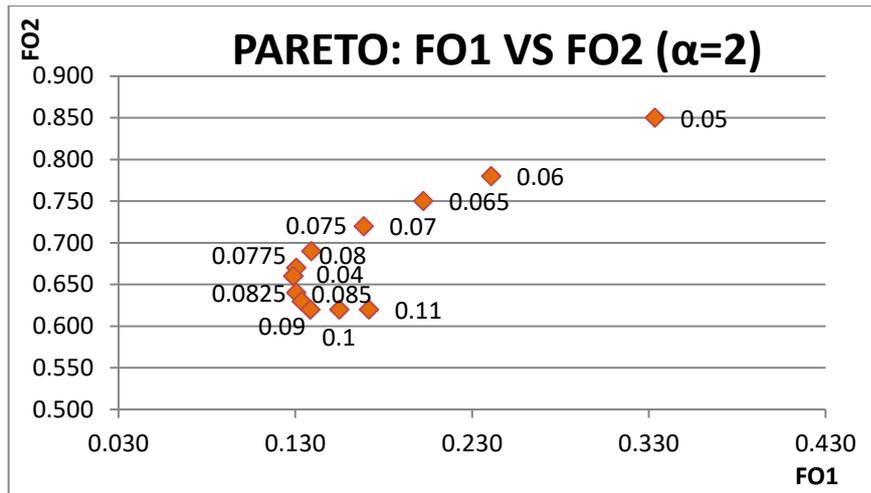


Figura 3.76: Función objetivo 1 vs función objetivo 2,  $\alpha=2$ , error promedio, 12-14 abril 2017, con todos los valores de rugosidad.

Fuente: Autora.

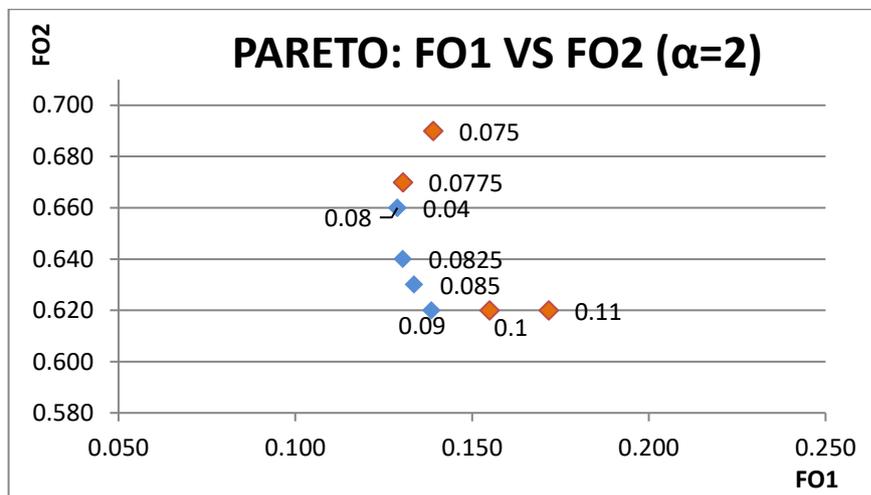


Figura 3.77: Función objetivo 1 vs función objetivo 2,  $\alpha=2$ , error promedio, 12-14 abril 2017, valores de interés.

Fuente: Autora.

En esta figura los valores de rugosidad con menor relación entre sus funciones objetivo son 0.08, 0.0825, 0.085 y 0.09.

Estos valores son no dominados porque:

- FO1 de 0.08 < FO1 de 0.0825, pero FO2 de 0.08 > FO2 de 0.0825.
- FO1 de 0.0825 < FO1 de 0.085, pero FO2 de 0.0825 > FO2 de 0.085.
- FO1 de 0.085 < FO1 de 0.09, pero FO2 de 0.085 > FO2 de 0.09.

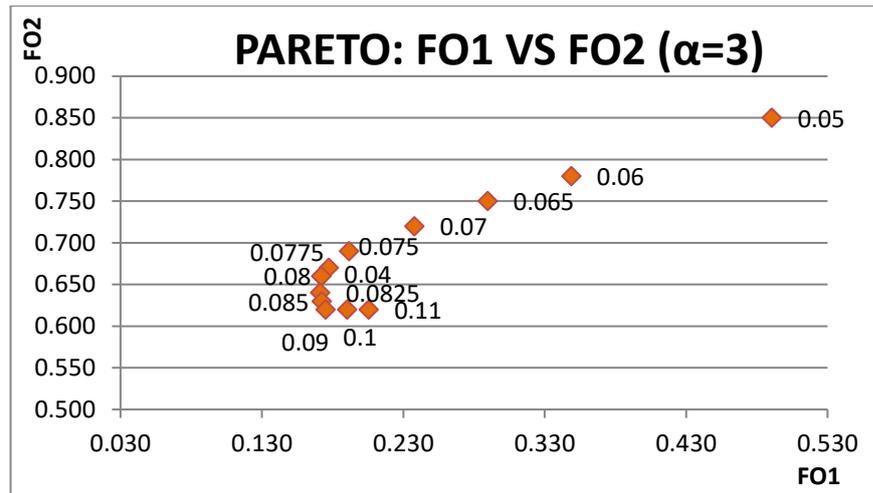


Figura 3.78: Función objetivo 1 vs función objetivo 2,  $\alpha=3$ , error promedio, 12-14 abril 2017, con todos los valores de rugosidad.

Fuente: Autora.

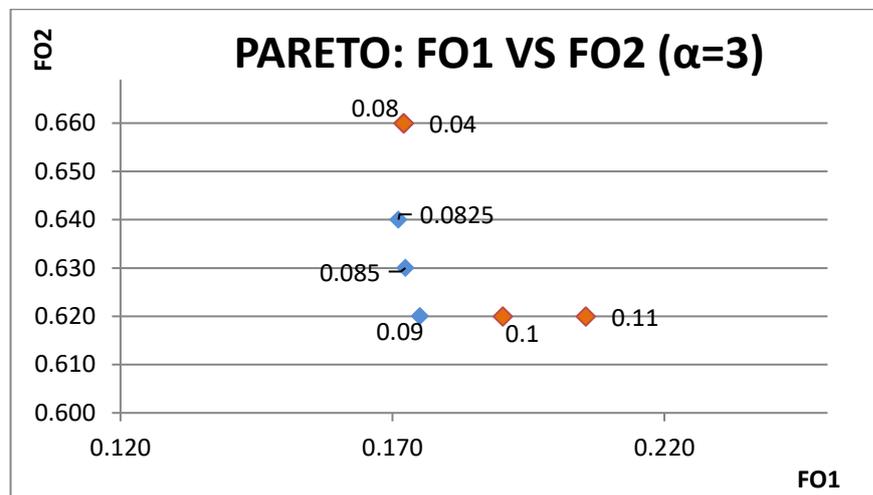


Figura 3.79: Función objetivo 1 vs función objetivo 2,  $\alpha=3$ , error promedio, 12-14 abril 2017, valores de interés.

Fuente: Autora.

Dentro de esta gráfica se observa que las rugosidades con menor relación de funciones objetivo son 0.0825, 0.085 y 0.09.

Estos valores son no dominados porque:

- FO1 de 0.0825 < FO1 de 0.085, pero FO2 de 0.0825 > FO2 de 0.085.
- FO1 de 0.085 < FO1 de 0.09, pero FO2 de 0.085 > FO2 de 0.09.

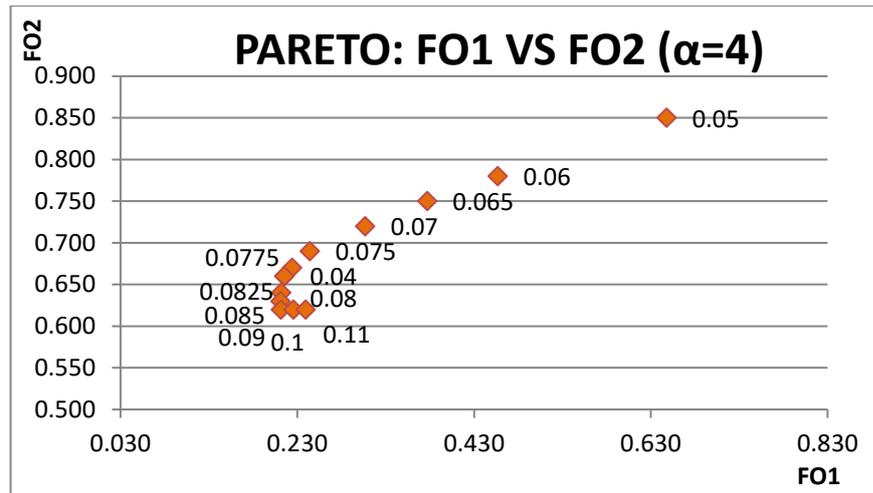


Figura 3.80: Función objetivo 1 vs función objetivo 2,  $\alpha=4$ , error promedio, 12-14 abril 2017, con todos los valores de rugosidad.

Fuente: Autora.

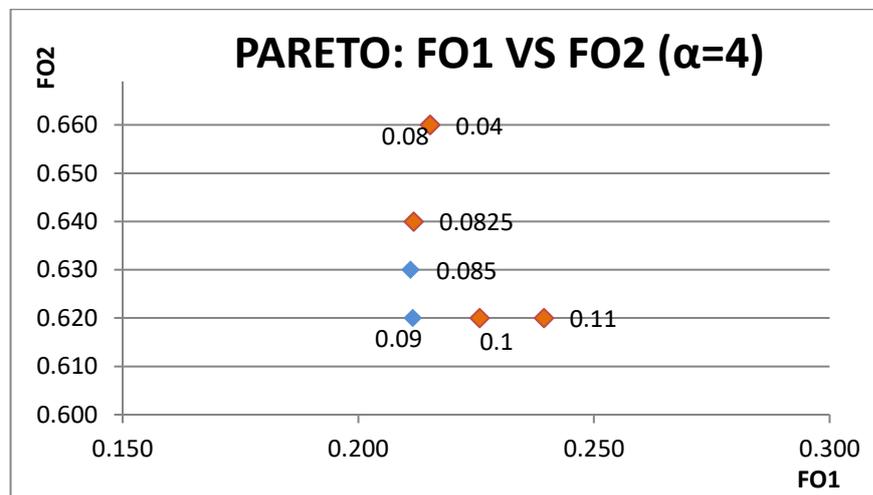


Figura 3.81: Función objetivo 1 vs función objetivo 2,  $\alpha=4$ , error promedio, 12-14 abril 2017, valores de interés.

Fuente: Autora.

En esta gráfica se muestra que, con las rugosidades de 0.085 y 0.09 se tiene las menores relaciones entre funciones objetivo.

Estos valores son no dominados porque:

- FO1 de 0.085 < FO1 de 0.09, pero FO2 de 0.085 > FO2 de 0.09.

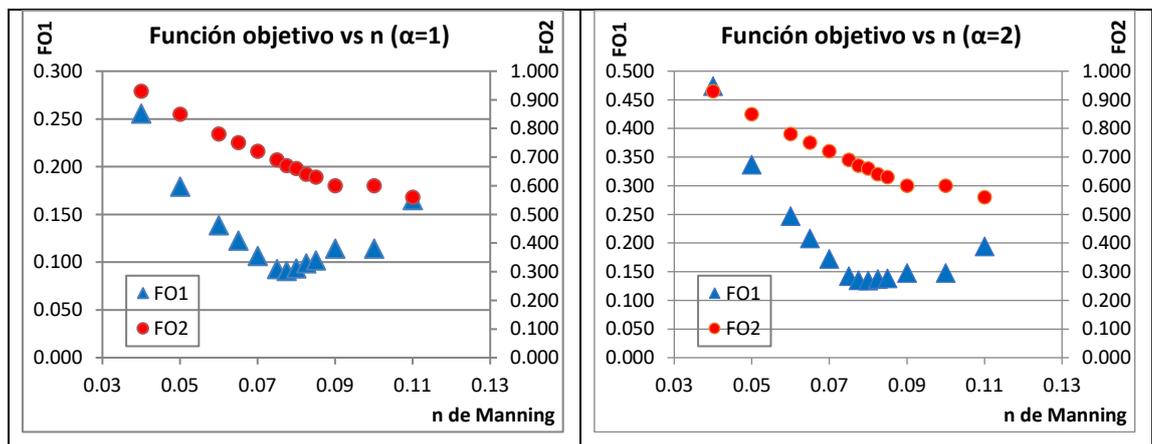
3.2.2.2. Error cuadrático

Tabla 3.14: Resumen frente de Pareto 2, error cuadrático, 12-14 abril 2017.

n	FO1 para cada valor de $\alpha$				FO2
	1	2	3	4	
0.04	0.255	0.474	0.692	0.910	0.930
0.05	0.179	0.337	0.494	0.652	0.850
0.06	0.139	0.247	0.355	0.463	0.780
0.065	0.123	0.208	0.293	0.378	0.750
0.07	0.107	0.173	0.239	0.305	0.720
0.075	0.093	0.142	0.192	0.241	0.690
0.0775	0.091	0.135	0.180	0.224	0.670
0.08	0.093	0.134	0.175	0.216	0.660
0.0825	0.099	0.137	0.176	0.215	0.640
0.085	0.102	0.138	0.175	0.212	0.630
0.09	0.114	0.148	0.182	0.215	0.600
0.1	0.114	0.148	0.182	0.215	0.600
0.11	0.165	0.194	0.223	0.252	0.560

Fuente: Autora.

Dentro de esta tabla se muestra los resultados obtenidos del frente de Pareto 2, para cada función objetivo, con el error cuadrático, en la cual para la FO1 se encuentran los menores valores en el rango de rugosidades entre 0.075 y 0.085 mientras que para la FO2 el rango se encuentra entre 0.09 a 0.11.



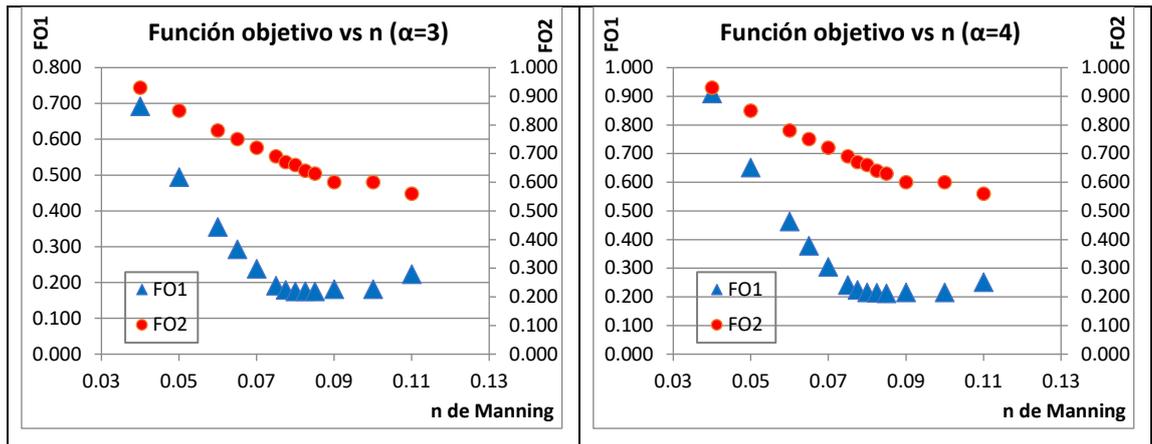


Figura 3.82: Función objetivo vs n de Manning,  $\alpha=1, 2, 3$  y 4, error cuadrático, 12-14 abril 2017.

Fuente: Autora.

Al analizar las últimas figuras se observa que para este frente de Pareto los valores de rugosidad con menor relación entre funciones objetivo estarán entre 0.07 y 0.11.

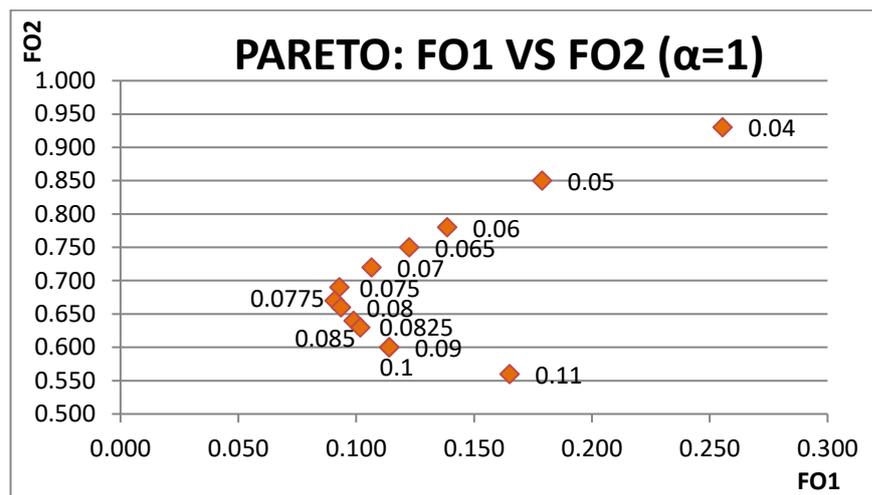


Figura 3.83: Función objetivo 1 vs función objetivo 2,  $\alpha=1$ , error cuadrático, 12-14 abril 2017, con todos los valores de rugosidad.

Fuente: Autora.

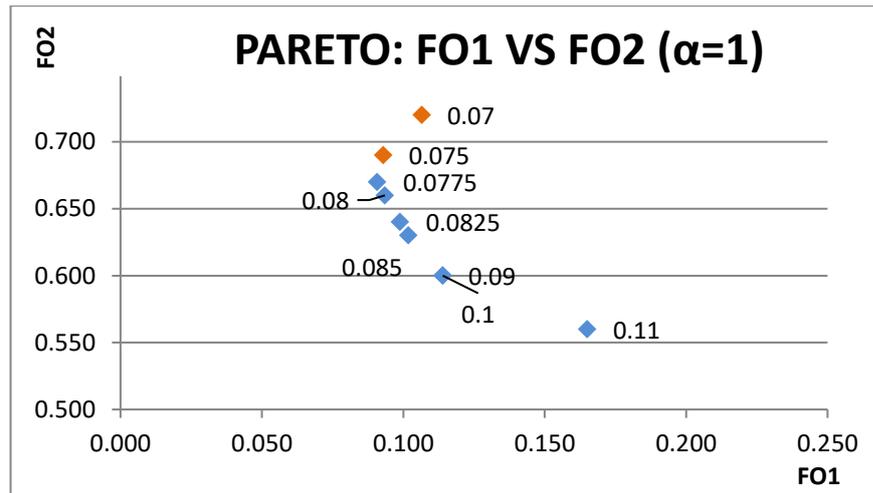


Figura 3.84: Función objetivo 1 vs función objetivo 2,  $\alpha=1$ , error cuadrático, 12-14 abril 2017, valores de interés.

Fuente: Autora.

Dentro de esta gráfica las rugosidades con menor relación entre funciones objetivo son 0.0775, 0.08, 0.0825, 0.085, 0.09-0.10 y 0.11.

Estos valores son no dominados porque:

- FO1 de 0.0775 < FO1 de 0.08, pero FO2 de 0.0775 > FO2 de 0.08.
- FO1 de 0.08 < FO1 de 0.0825, pero FO2 de 0.08 > FO2 de 0.0825.
- FO1 de 0.0825 < FO1 de 0.085, pero FO2 de 0.0825 > FO2 de 0.085.
- FO1 de 0.085 < FO1 de 0.09, 0.10, pero FO2 de 0.085 > FO2 de 0.09, 0.10.
- FO1 de 0.09, 0.10 < FO1 de 0.11, pero FO2 de 0.09, 0.10 > FO2 de 0.11.

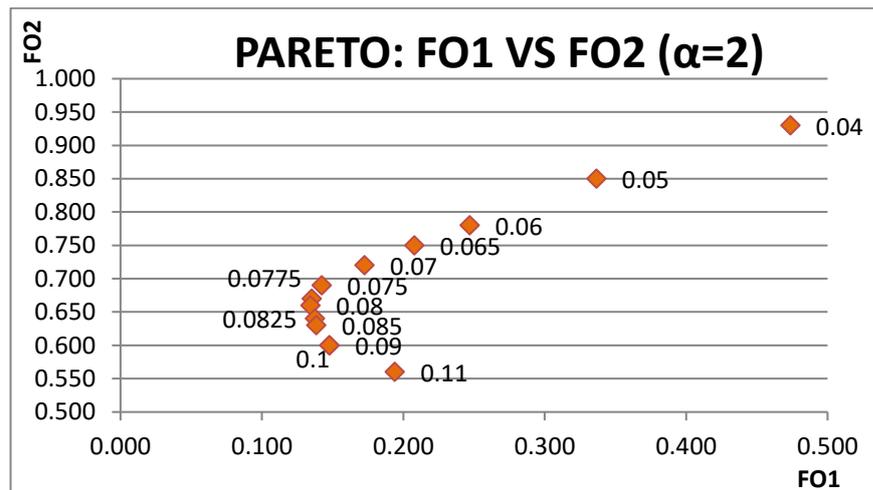


Figura 3.85: Función objetivo 1 vs función objetivo 2,  $\alpha=2$ , error cuadrático, 12-14 abril 2017, con todos los valores de rugosidad.

Fuente: Autora.

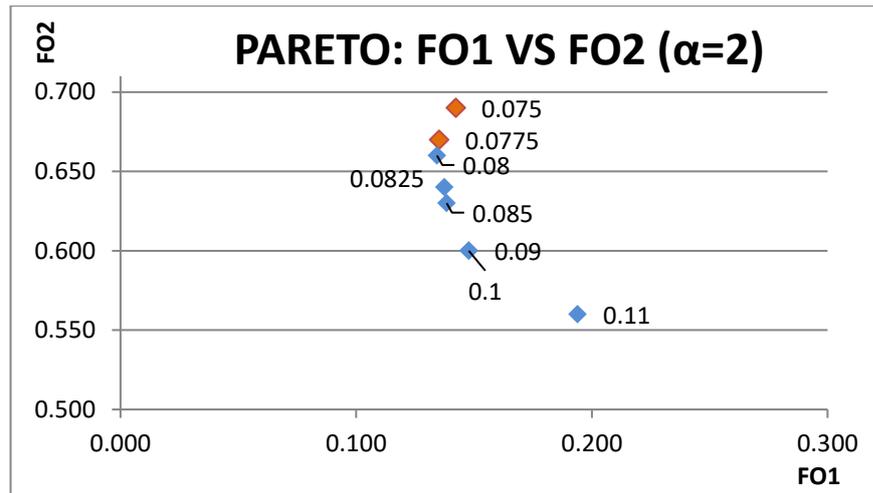


Figura 3.86: Función objetivo 1 vs función objetivo 2,  $\alpha=2$ , error cuadrático, 12-14 abril 2017, valores de interés.

Fuente: Autora.

En este caso las rugosidades con menor relación entre funciones objetivo son 0.08, 0.0825, 0.085, 0.09-0.10 y 0.11.

Estos valores son no dominados porque:

- FO1 de 0.08 < FO1 de 0.0825, pero FO2 de 0.08 > FO2 de 0.0825.
- FO1 de 0.0825 < FO1 de 0.085, pero FO2 de 0.0825 > FO2 de 0.085.
- FO1 de 0.085 < FO1 de 0.09, 0.10, pero FO2 de 0.085 > FO2 de 0.09, 0.10.
- FO1 de 0.09, 0.10 < FO1 de 0.11, pero FO2 de 0.09, 0.10 > FO2 de 0.11.

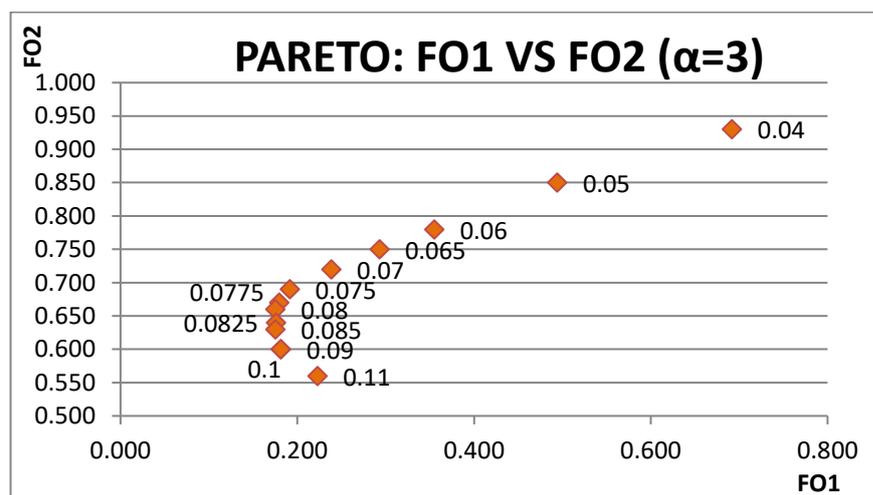


Figura 3.87: Función objetivo 1 vs función objetivo 2,  $\alpha=3$ , error cuadrático, 12-14 abril 2017, con todos los valores de rugosidad.

Fuente: Autora.

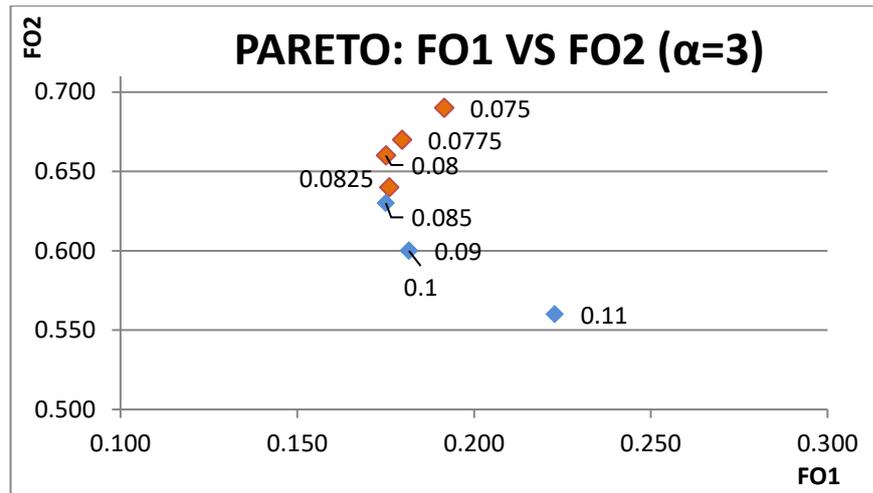


Figura 3.88: Función objetivo 1 vs función objetivo 2,  $\alpha=3$ , error cuadrático, 12-14 abril 2017, valores de interés.

Fuente: Autora.

Los valores de rugosidad con menor relación entre funciones objetivo son 0.085, 0.09-0.10 y 0.11. Son no dominados porque:

- FO1 de 0.085 < FO1 de 0.09, 0.10, pero FO2 de 0.085 > FO2 de 0.09, 0.10.
- FO1 de 0.09, 0.10 < FO1 de 0.11, pero FO2 de 0.09, 0.10 > FO2 de 0.11.

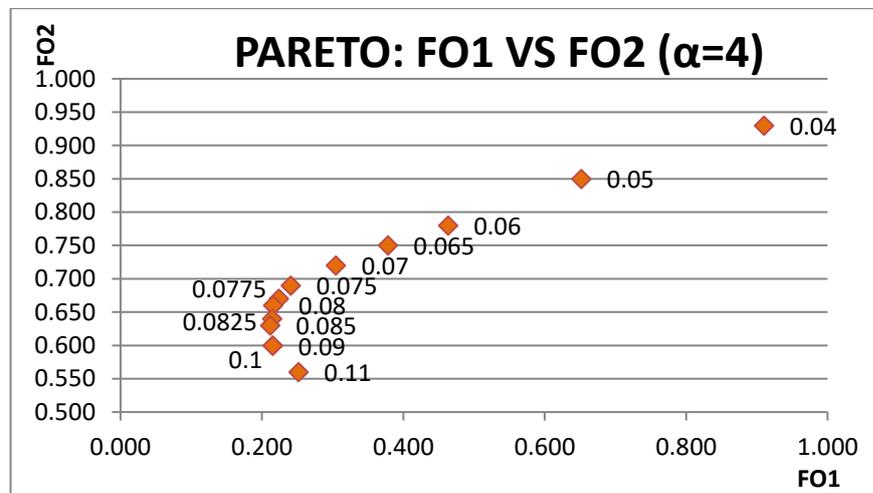


Figura 3.89: Función objetivo 1 vs función objetivo 2,  $\alpha=4$ , error cuadrático, 12-14 abril 2017, con todos los valores de rugosidad.

Fuente: Autora.

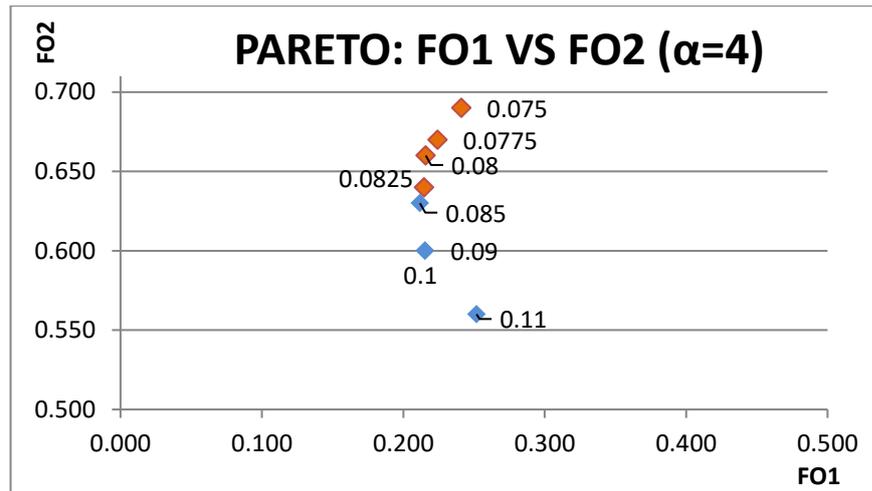


Figura 3.90: Función objetivo 1 vs función objetivo 2,  $\alpha=4$ , error cuadrático, 12-14 abril 2017, valores de interés.

Fuente: Autora.

Como se mencionó anteriormente las rugosidades de 0.085, 0.09-0.10 y 0.11 son las que tienen menor relación entre funciones objetivo.

Estos valores son no dominados porque:

- FO1 de 0.085 < FO1 de 0.09, 0.10, pero FO2 de 0.085 > FO2 de 0.09, 0.10.
- FO1 de 0.09, 0.10 < FO1 de 0.11, pero FO2 de 0.09, 0.10 > FO2 de 0.11.

A continuación, se presenta la recopilación de los valores no dominados obtenidos en el análisis de las gráficas posteriores, los mismos que se encuentran en el rango de 0.0775 hasta 0.11, teniendo un promedio de 0.089.

Tabla 3.15: Resumen valores no dominados, frente de Pareto 2, 12-14 abril 2017.

Valor de $\alpha$	Método de evaluación del error del HEC-RAS	
	Error promedio	Error cuadrático
1	0.0775	0.0775
	0.08	0.08
	0.0825	0.0825
	0.085	0.085
	0.09	0.09-0.10
2	0.08	0.08
	0.0825	0.0825
	0.085	0.085
	0.09	0.09-0.10
	0.11	0.11
3	0.0825	0.085
	0.085	0.09-0.10
	0.09	0.11
4	0.085	0.085
	0.09	0.09-0.10
		0.11

Fuente: Autora.

### 3.2.3. Frente de Pareto 3

#### 3.2.3.1. Error promedio

Tabla 3.16: Resumen frente de Pareto 3, error promedio, 12-14 abril 2017

n	FO1 para cada valor de $\alpha$				FO2
	1	2	3	4	
0.04	0.000514	0.000906	0.001297	0.001689	0.000161
0.05	0.001253	0.002444	0.003635	0.004826	0.000268
0.06	0.000833	0.001593	0.002353	0.003113	0.000225
0.065	0.000687	0.001290	0.001894	0.002497	0.000208
0.07	0.000594	0.001094	0.001594	0.002094	0.000192
0.075	0.000538	0.000972	0.001407	0.001841	0.000176
0.0775	0.000520	0.000928	0.001336	0.001743	0.000166
0.08	0.000514	0.000906	0.001297	0.001689	0.000161
0.0825	0.000512	0.000886	0.001260	0.001634	0.000152
0.085	0.000522	0.000885	0.001248	0.001610	0.000147
0.09	0.000552	0.000900	0.001248	0.001595	0.000142
0.1	0.000684	0.001038	0.001392	0.001747	0.000142
0.11	0.000853	0.001180	0.001507	0.001833	0.000142

Fuente: Autora.

En esta tabla se muestra la recopilación de valores obtenidos en el cálculo para el frente del Pareto 3 con uso del error promedio mostrando los menores valores para la FO1 en el rango entre 0.08 y 0.09, mientras que para la FO2 se encuentre entre 0.085 a 0.11.

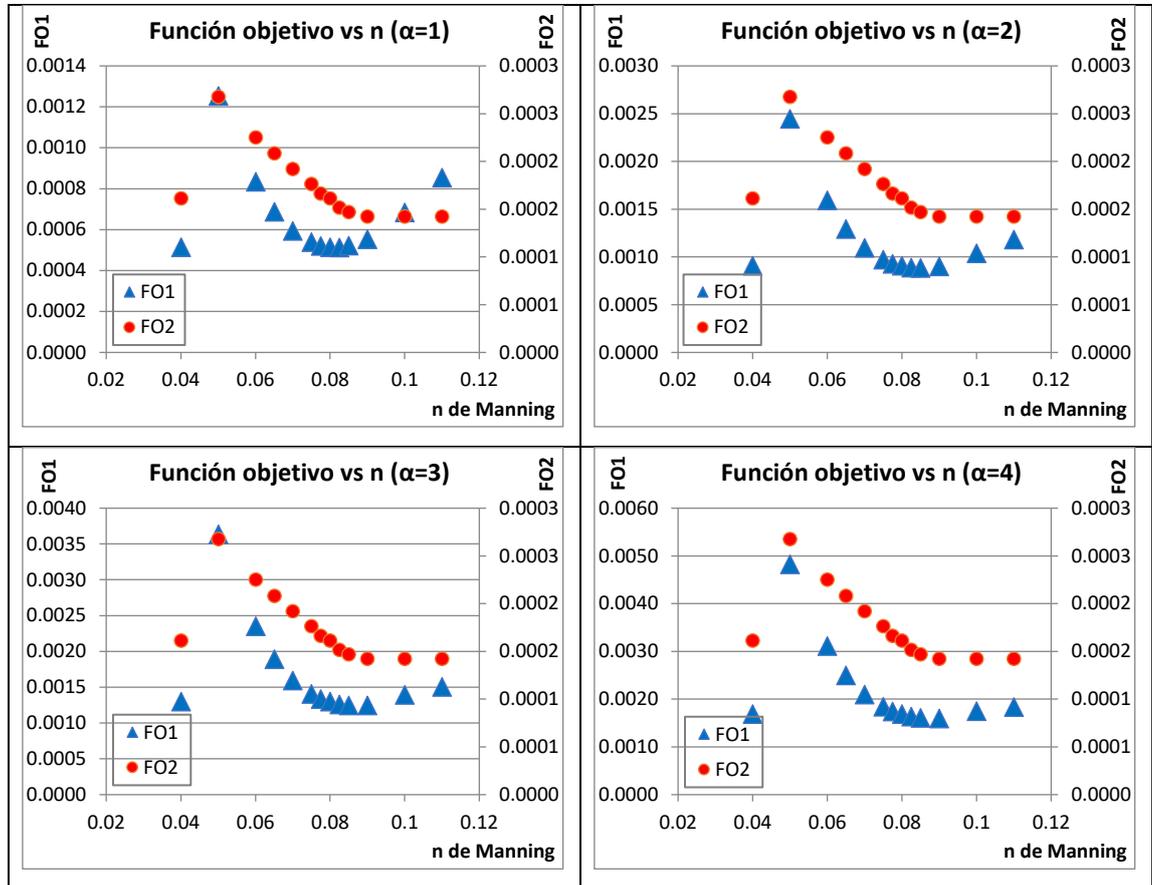


Figura 3.91: Función objetivo vs n de Manning,  $\alpha=1, 2, 3$  y  $4$ , error promedio, 12-14 abril 2017.

Fuente: Autora.

Para este frente de Pareto se observa que las rugosidades con menor relación entre sus funciones objetivo se encontrarán entre 0.08 y 0.09.

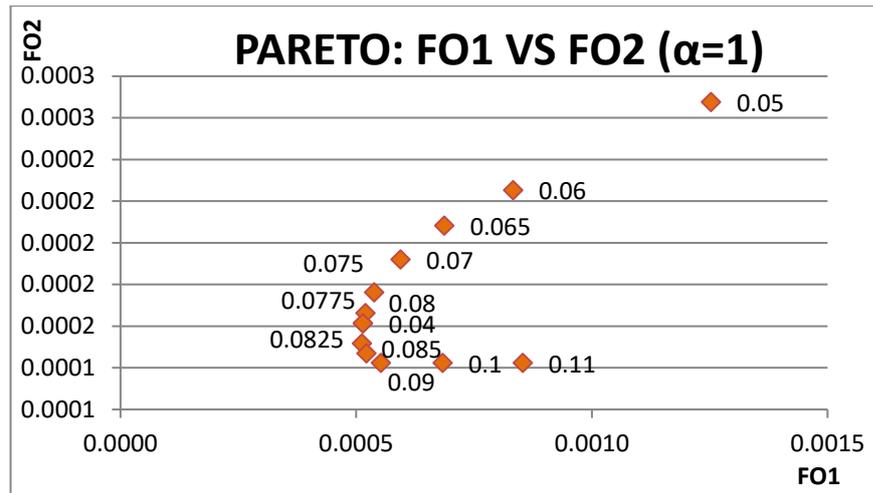


Figura 3.92: Función objetivo 1 vs función objetivo 2,  $\alpha=1$ , error promedio, 12-14 abril 2017, con todos los valores de rugosidad.

Fuente: Autora.

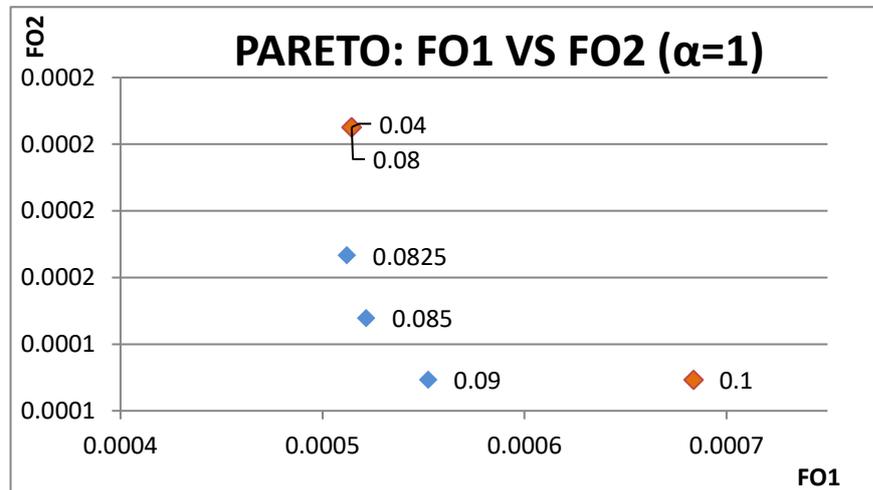


Figura 3.93: Función objetivo 1 vs función objetivo 2,  $\alpha=1$ , error promedio, 12-14 abril 2017, valores de interés.

Fuente: Autora.

Dentro de esta figura se observa que las rugosidades con menor relación entre funciones objetivos son 0.0825, 0.085 y 0.09.

Estos valores son no dominados porque:

- FO1 de 0.0825 < FO1 de 0.085, pero FO2 de 0.0825 > FO2 de 0.085.
- FO1 de 0.085 < FO1 de 0.09, pero FO2 de 0.085 > FO2 de 0.09.

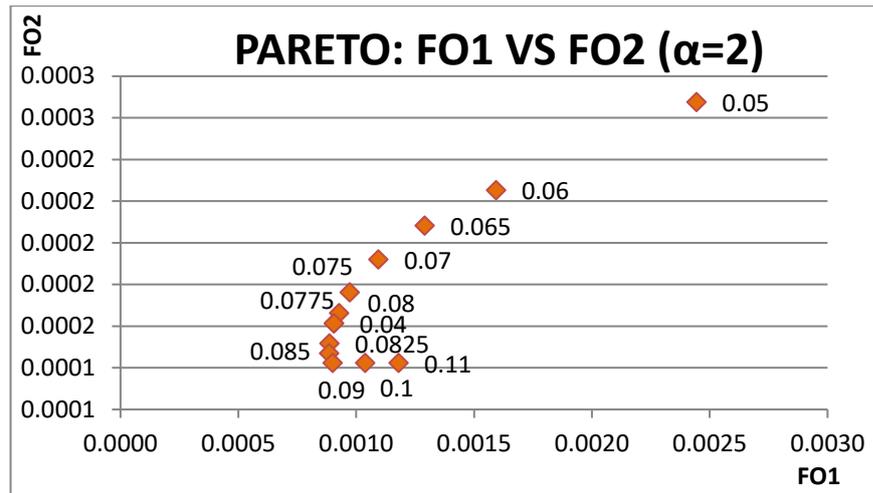


Figura 3.94: Función objetivo 1 vs función objetivo 2,  $\alpha=2$ , error promedio, 12-14 abril 2017, con todos los valores de rugosidad.

Fuente: Autora.

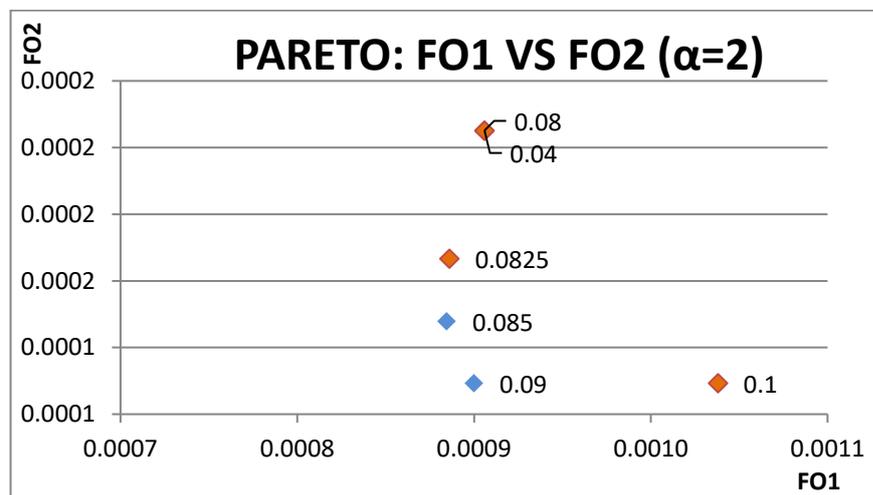


Figura 3.95: Función objetivo 1 vs función objetivo 2,  $\alpha=2$ , error promedio, 12-14 abril 2017, valores de interés.

Fuente: Autora.

Las rugosidades de 0.085 y 0.09 son las que tienen menor relación entre sus funciones objetivo.

Estos valores son no dominados porque:

- FO1 de 0.085 < FO1 de 0.09, pero FO2 de 0.085 > FO2 de 0.09.

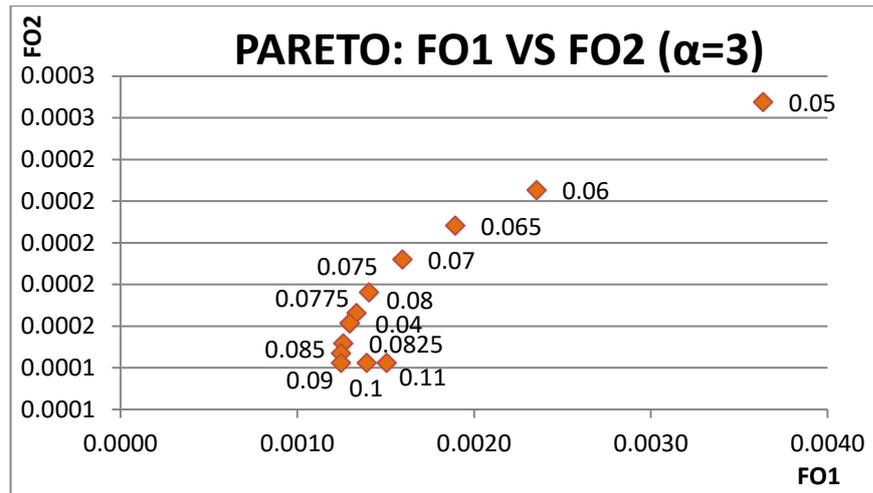


Figura 3.96: Función objetivo 1 vs función objetivo 2,  $\alpha=3$ , error promedio, 12-14 abril 2017, con todos los valores de rugosidad.

Fuente: Autora.

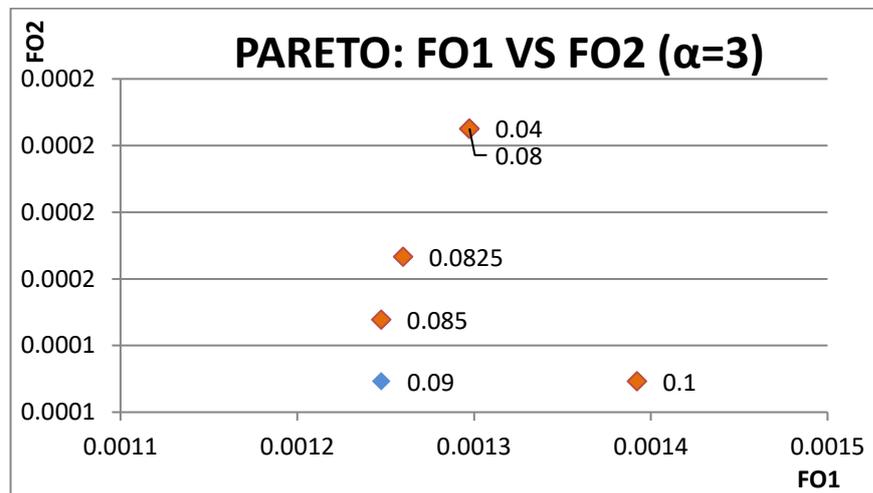


Figura 3.97: Función objetivo 1 vs función objetivo 2,  $\alpha=3$ , error promedio, 12-14 abril 2017, valores de interés.

Fuente: Autora.

En esta gráfica la rugosidad de 0.09 es la que presenta menor relación entre sus funciones objetivo.

- El valor no dominado es 0.09.

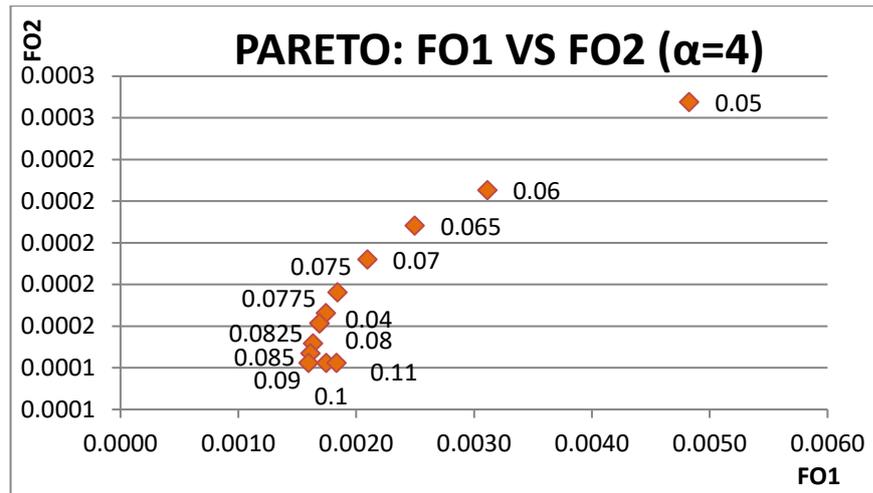


Figura 3.98: Función objetivo 1 vs función objetivo 2,  $\alpha=4$ , error promedio, 12-14 abril 2017, con todos los valores de rugosidad.

Fuente: Autora.

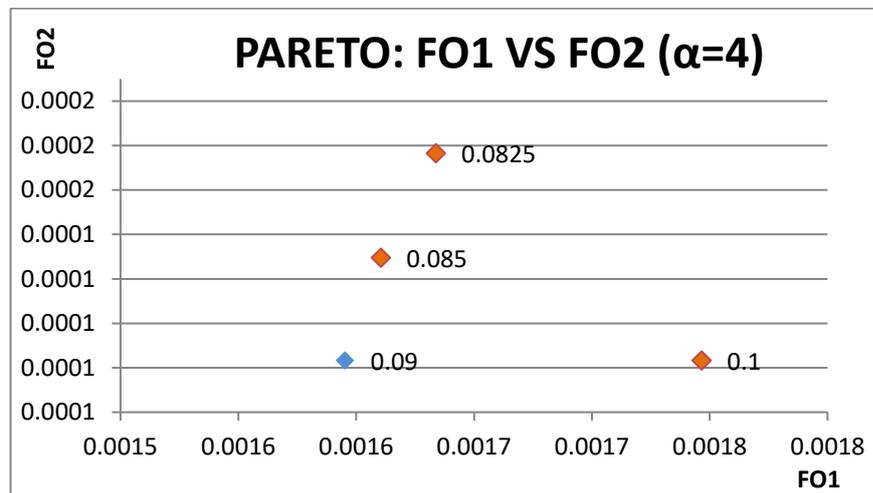


Figura 3.99: Función objetivo 1 vs función objetivo 2,  $\alpha=4$ , error promedio, 12-14 abril 2017, valores de interés.

Fuente: Autora.

Dentro de esta última gráfica se puede ver claramente que la rugosidad de 0.09 tiene la menor relación entre sus funciones objetivo.

- El valor no dominado es 0.09.

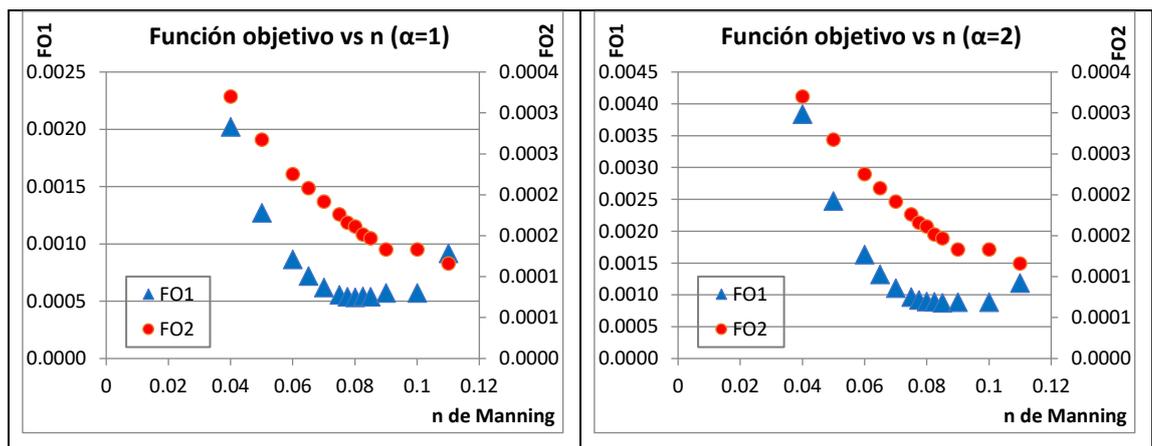
3.2.3.2. Error cuadrático

Tabla 3.17: Resumen frente de Pareto 3, error cuadrático, 12-14 abril 2017.

n	FO1 para cada valor de $\alpha$				FO2
	1	2	3	4	
0.04	0.00202	0.00384	0.00566	0.00747	0.00032
0.05	0.00127	0.00248	0.00368	0.00489	0.00027
0.06	0.00087	0.00163	0.00240	0.00317	0.00023
0.065	0.00072	0.00132	0.00192	0.00252	0.00021
0.07	0.00062	0.00110	0.00159	0.00207	0.00019
0.075	0.00056	0.00096	0.00137	0.00178	0.00018
0.0775	0.00054	0.00092	0.00131	0.00169	0.00017
0.08	0.00053	0.00090	0.00126	0.00163	0.00016
0.0825	0.00054	0.00089	0.00124	0.00159	0.00015
0.085	0.00054	0.00088	0.00121	0.00154	0.00015
0.09	0.00057	0.00088	0.00120	0.00151	0.00013
0.1	0.00057	0.00088	0.00120	0.00151	0.00013
0.11	0.00092	0.00119	0.00145	0.00172	0.00012

Fuente: Autora.

En la tabla presentada se muestran los resultados obtenidos de los cálculos del frente de Pareto 3 para cada función objetivo, con el error cuadrático, en la cual muestra que las rugosidades con menor valor en la FO1 se encuentran entre 0.075 y 0.085, mientras que para la FO2 este rango está entre 0.0825 y 0.11.



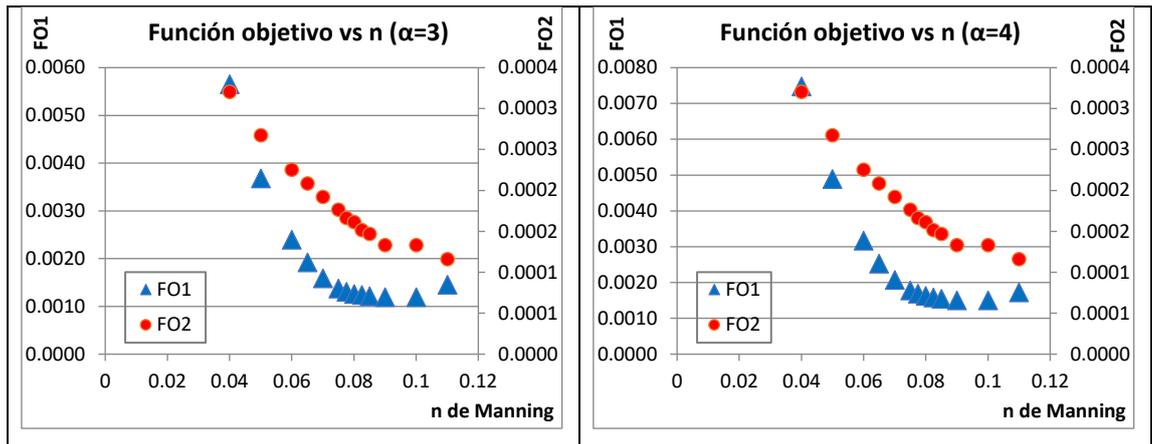


Figura 3.100: Función objetivo vs n de Manning,  $\alpha=1, 2, 3$  y 4, error cuadrático, 12-14 ABR 2017.

Fuente: Autora.

Al observar las gráficas se determina que las rugosidades con menor relación entre sus funciones objetivo se van a encontrar entre los valores de 0.08 y 0.11.

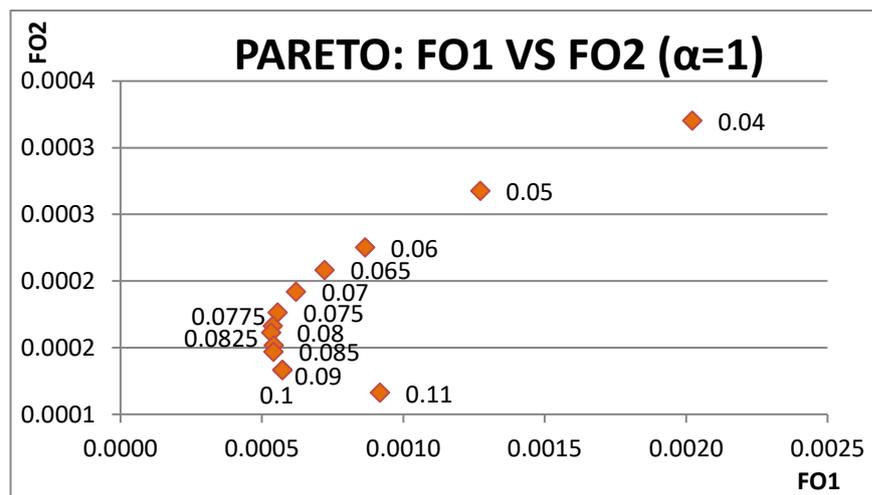


Figura 3.101: Función objetivo 1 vs función objetivo 2,  $\alpha=1$ , error cuadrático, 12-14 abril 2017, con todos los valores de rugosidad.

Fuente: Autora.

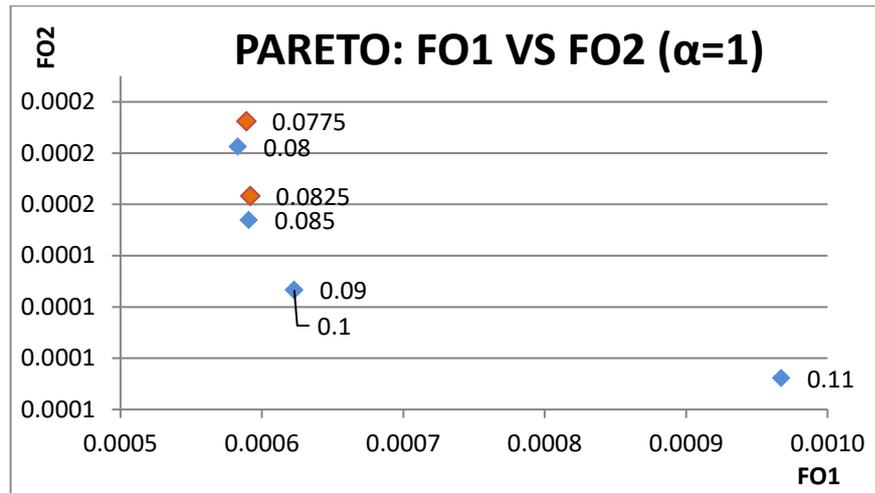


Figura 3.102: Función objetivo 1 vs función objetivo 2,  $\alpha=1$ , error cuadrático, 12-14 abril 2017, valores de interés.

Fuente: Autora.

Los valores de rugosidad con menores valores en sus funciones objetivo son 0.08, 0.085, 0.09-0.10 y 0.11.

Estos valores son no dominados porque:

- FO1 de 0.08 < FO1 de 0.085, pero FO2 de 0.08 > FO2 de 0.085.
- FO1 de 0.085 < FO1 de 0.09, 0.10, pero FO2 de 0.085 > FO2 de 0.09, 0.10.
- FO1 de 0.09, 0.10 < FO1 de 0.11, pero FO2 de 0.09, 0.10 > FO2 de 0.11.

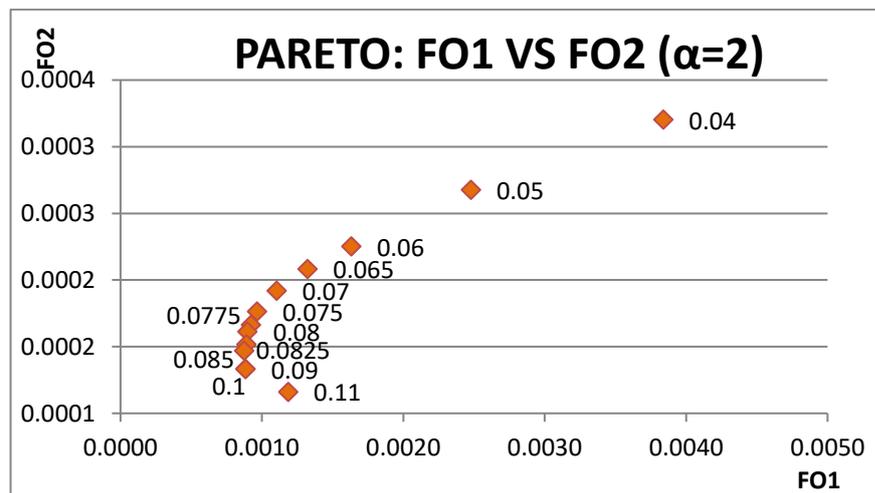


Figura 3.103: Función objetivo 1 vs función objetivo 2,  $\alpha=2$ , error cuadrático, 12-14 abril 2017, con todos los valores de rugosidad.

Fuente: Autora.

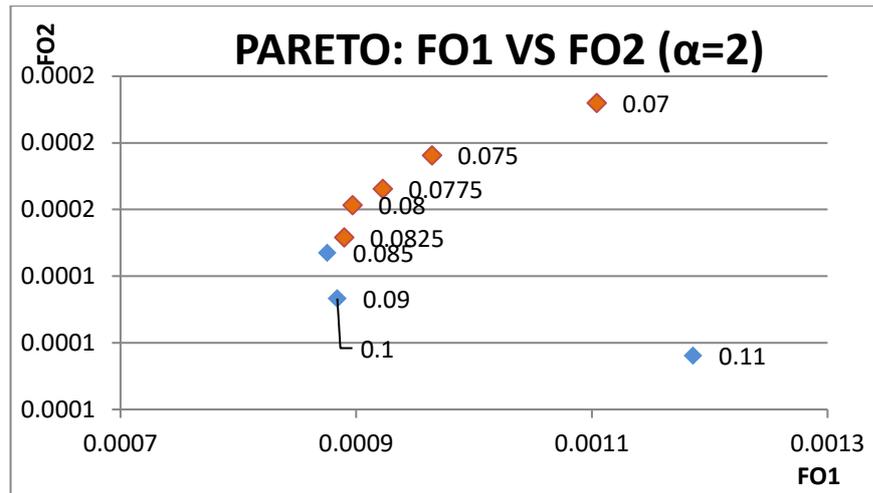


Figura 3.104: Función objetivo 1 vs función objetivo 2,  $\alpha=2$ , error cuadrático, 12-14 abril 2017, valores de interés.

Fuente: Autora.

Dentro de esta figura se muestra que las rugosidades 0.085, 0.09-0.10 y 0.11 tienen los menores valores entre sus funciones objetivo, siendo los más bajos.

Estos valores son no dominados porque:

- FO1 de 0.085 < FO1 de 0.09, 0.10, pero FO2 de 0.085 > FO2 de 0.09, 0.10.
- FO1 de 0.09, 0.10 < FO1 de 0.11, pero FO2 de 0.09, 0.10 > FO2 de 0.11.

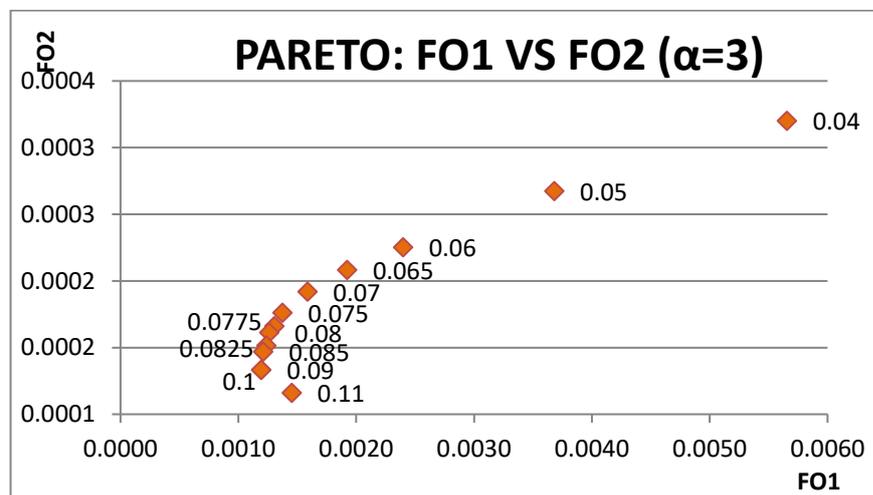


Figura 3.105: Función objetivo 1 vs función objetivo 2,  $\alpha=3$ , error cuadrático, 12-14 abril 2017, con todos los valores de rugosidad.

Fuente: Autora.

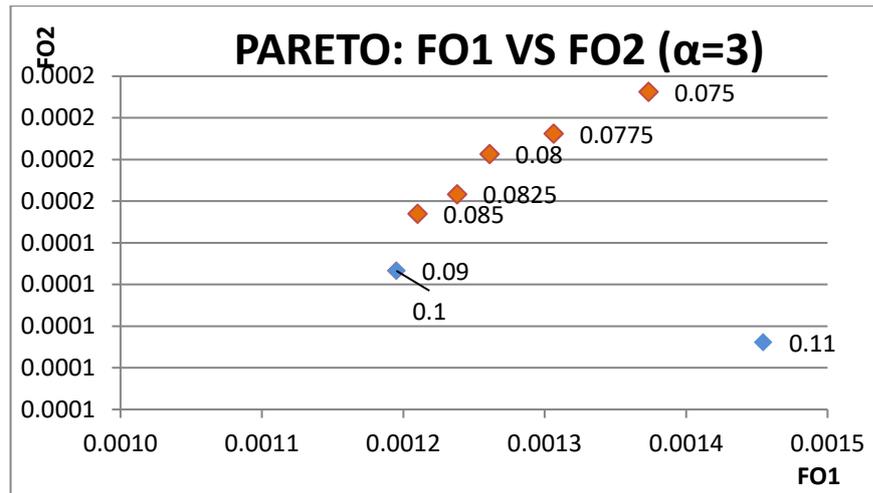


Figura 3.106: Función objetivo 1 vs función objetivo 2,  $\alpha=3$ , error cuadrático, 12-14 abril 2017, valores de interés.

Fuente: Autora.

En la última figura presentada se puede observar que los valores de rugosidad de 0.09-0.10 y 0.11 son los que tienen los menores valores en sus funciones objetivo respectivamente.

Estos valores son no dominados porque:

- FO1 de 0.09, 0.10 < FO1 de 0.11, pero FO2 de 0.09, 0.10 > FO2 de 0.11.

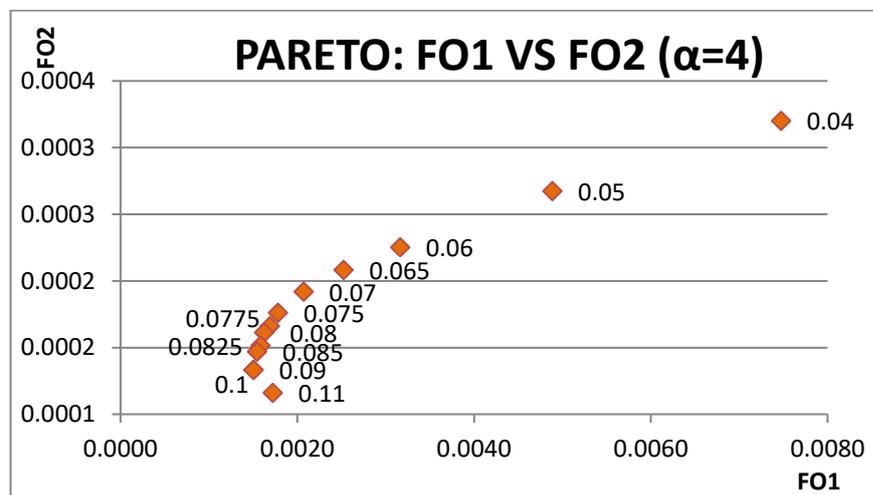


Figura 3.107: Función objetivo 1 vs función objetivo 2,  $\alpha=4$ , error cuadrático, 12-14 abril 2017, con todos los valores de rugosidad.

Fuente: Autora.

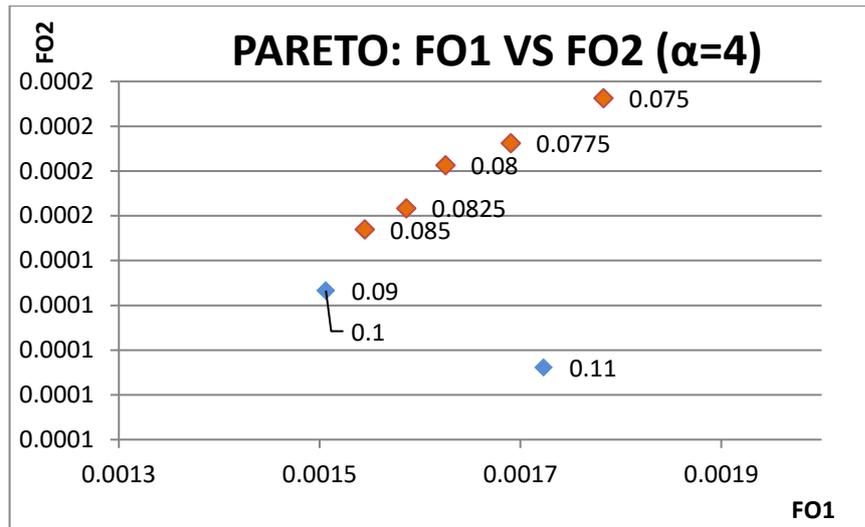


Figura 3.108: Función objetivo 1 vs función objetivo 2,  $\alpha=4$ , error cuadrático, 12-14 abril2017, valores de interés.

Fuente: Autora.

Dentro de esta figura se observa que los valores que tienen las relaciones entre sus funciones objetivo bajas son 0.09-0.10 y 0.11.

Estos valores son no dominados porque:

- FO1 de 0.09, 0.10 < FO1 de 0.11, pero FO2 de 0.09, 0.10 > FO2 de 0.11.

A continuación, se presenta los valores no dominados para el frente de Pareto tres que se encuentran en el rango entre 0.08 a 0.11, teniendo un promedio de 0.094.

Tabla 3.18: Resumen valores no dominados, frente de Pareto 3, 12-14 abril 2017.

Valor de $\alpha$	Método de evaluación del error del HEC-RAS	
	Error promedio	Error cuadrático
1	0.0825	0.08
	0.085	0.085
	0.09	0.09-0.10
		0.11
2	0.085	0.085
	0.09	0.09-0.10
		0.11
3	0.09	0.09-0.10
		0.11
4	0.09	0.09-0.10
		0.11

Fuente: Autora.

## CONCLUSIONES

Se generaron varios escenarios de simulación con el modelo hidráulico del río Yanuncay utilizando el programa HEC-RAS y variando la rugosidad inicial desde 0.04 hasta 0.11, lo que permitió comparar los niveles simulados con los observados y determinar el escenario que más se aproxima a la realidad.

En cada simulación realizada se varió el método de evaluación del error entre el error promedio y error medio cuadrático, observándose pequeñas variaciones en los resultados de los niveles simulados cuando se cambia esta opción del programa HEC-RAS.

Se realizó cada uno de los frentes de Pareto propuestos corriendo el modelo hidráulico con dos eventos extremos reales de caudal: 9 al 12 de marzo de 2017 y 12 al 14 de abril de 2017, lo que permitió determinar los valores no dominados de la  $n$  de Manning inicial.

A continuación, se presenta un resumen de los valores no dominados para cada frente de Pareto.

### **Evento del 9-12 marzo 2017:**

- Frente de Pareto 1: con  $\alpha=1$  valores de 0.07 a 0.0825, con  $\alpha=2$  valores de 0.07 a 0.085, con  $\alpha=3$  valores entre 0.07 a 0.09 y con  $\alpha=4$  valores entre 0.07 y 0.11.
- Frente de Pareto 2: con  $\alpha=1$  valores de 0.07 a 0.0825, con  $\alpha=2$  valores de 0.07 a 0.085, con  $\alpha=3$  valores entre 0.07 a 0.09 y con  $\alpha=4$  valores entre 0.07 y 0.11.
- Frente de Pareto 3: con  $\alpha=1$  valores de 0.07 a 0.08, con  $\alpha=2$  valores de 0.07 a 0.0825, con  $\alpha=3$  valores entre 0.07 a 0.085 y con  $\alpha=4$  valores entre 0.07 y 0.085.

La rugosidad promedio entre los tres frentes de Pareto es 0.081.

### **Evento del 12-14 abril 2017:**

- Frente de Pareto 1: con  $\alpha=1$  valores de 0.0775 a 0.11, con  $\alpha=2$  valores de 0.08 a 0.11, con  $\alpha=3$  valores entre 0.0825 a 0.11 y con  $\alpha=4$  valores entre 0.085 y 0.11.
- Frente de Pareto 2: con  $\alpha=1$  valores de 0.0775 a 0.11, con  $\alpha=2$  valores de 0.08 a 0.11, con  $\alpha=3$  valores entre 0.0825 a 0.11 y con  $\alpha=4$  valores entre 0.085 y 0.11.
- Frente de Pareto 3: con  $\alpha=1$  valores de 0.08 a 0.11, con  $\alpha=2$  valores de 0.085 a 0.11, con  $\alpha=3$  valores entre 0.09 a 0.11 y con  $\alpha=4$  valores entre 0.09 y 0.11.

La rugosidad promedio entre los tres frentes de Pareto es 0.091

Se calcularon los coeficientes de Nash and Sutcliffe y Smirnov – Kolmogorov cuyos resultados indican que la  $n$  de Manning inicial que mejor se ajusta a la realidad varía entre 0.07 y 0.11 para Nash y Sutcliffe, y varía entre 0.06 y 0.11 para Smirnov-Kolmogorov.

## **RECOMENDACIONES**

Se podría ampliar el estudio corriendo el modelo hidráulico con una mayor cantidad de eventos extremos de caudal.

Se recomienda realizar un análisis de sensibilidad a otros parámetros que intervienen en la calibración del modelo hidráulico en régimen impermanente.

Se podrían realizar más pruebas de bondad de ajuste de datos que sirvan de apoyo y comparación de los resultados obtenidos.

## BIBLIOGRAFÍA

- Benayas, R. (20 de Noviembre de 2014). CursosGIS.com. Recuperado el 17 de Marzo de 2019, de <https://www.cursosgis.com/que-es-hec-ras-y-para-que-sirve/>
- Bladé, E., Cea, L., & Corestein, G. (2014). Modelización numérica de inundaciones fluviales. *Ingeniería del Agua*, 73-75.
- Brunner, G. W. (2016). HEC-RAS River Analysis System. User's Manual. Estados Unidos: US Army Corps of Engineers.
- Cabrera, I. J. (2015). Calibración de Modelos Hidrológicos. Recuperado el 29 de Enero de 2019, de [http://www.imefen.uni.edu.pe/Temas\\_interes/modhidro\\_2.pdf](http://www.imefen.uni.edu.pe/Temas_interes/modhidro_2.pdf)
- Centro de Estudios de Hidrosistemas, C. (20 de Marzo de 2013). Modelación de hidrodinámica fluvial. Quito, Ecuador.
- Centro Español de Metrología. (2013). Procedimiento de calibración. España.
- Chow, V. T. (1994). Hidráulica de canales abiertos. Bogotá: McGRAW-HILL.
- Coppola, M. (2016). Estudio hidrográfico del Río Basento (Italia). Catalunya, España.
- Espinoza, P., & Vintimilla, G. (Octubre de 2013). Caracterización del comportamiento hidráulico de un tramo del río Calabí en el sector de toma utilizando un modelo matemático. Cuenca, Ecuador.
- Fernández de Córdova, C., & Rodríguez, Y. (2016). Primeros resultados de la red actual de monitoreo hidrometeorológico de Cuenca, Ecuador. *Ing. Hidráulica Ambient. Cent. Investig. Hidráulicas Univ. Tecnológica Habana José Antonio Echeverría Cujae* 37, 44-56.
- Fernández de Córdova, C., León, A., & Rodríguez, Y. (2016). Comparación de alternativas para el cálculo de la “n” de Manning en cauces naturales: caso de estudio estación de Barabón de la cuenca del río Yanuncay en Ecuador. Presentado en la 18 Convención Científica de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría (Cujae).
- Fernández de Córdova, C., León, A., & Rodríguez, Y. (2018c). Estimación del coeficiente de rugosidad por fórmulas empíricas en cauces naturales.

Presentado en el XXXVI Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental "En vía al desarrollo sostenible". Guayaquil.

Fernández de Córdova, C., León, A., Rodríguez, Y., & Martínez, P. M. (2018b). Influencia del método de estimación en el coeficiente de Manning para cauces naturales. Ing. Hidráulica Ambient. Cent. Investig. Hidráulicas Univ. Tecnológica Habana José Antonio Echeverría Cujae 39, 17–31.

Fernández de Córdova, C., León, A., Rodríguez, Y., & Placencio, J. (2018a). Factores que influyen en las inundaciones: n de Manning por el método de flotadores. Presentado en la 19 Convención Científica de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría (Cujae),. La Habana.

González C, M. B., Pire R, S. F., Cuesta Zedeño, L. F., & López J, P. A. (2013). Metodología para la calibración de modelos de dispersión de contaminantes atmosféricos. Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquía, 276.

Herrera P, A. A. (2004). Modelación Hidráulica. Obtenido de [http://www.biblioteca.udep.edu.pe/bibvirudep/tesis/pdf/1\\_123\\_183\\_81\\_1150.pdf](http://www.biblioteca.udep.edu.pe/bibvirudep/tesis/pdf/1_123_183_81_1150.pdf)

López, R. L. (2017). Procedimiento para la simulación hidráulica a partir de los software ArcGIS y HEC-RAS para eventos extremos máximos. Villa Clara, Cuba.

Luque, G. G. (Septiembre de 2013). Diseño multiobjetivo de un sistema de abastecimiento de agua incluyendo la cosecha de agua de lluvia como recurso complementario. Valencia, España.

Mariano, R. C., & Alcocer, Y. V. (29 de Diciembre de 2005). Diseño de sistemas hidráulicos bajo criterios de optimización de puntos de pliegue y múltiples criterios. Ingeniería hidráulica en México, 34-36. Obtenido de <https://actualicese.com/actualidad/2017/12/29/clasificacion-de-los-presupuestos/>

Marquéz F, C. A. (Febrero de 2012). Obtenido de <https://carlosmarquez.files.wordpress.com/2012/02/prueba-de-bondad-de-ajuste.pdf>

- Martinez, M., Blasco, X., Herrero, J. M., Ramos, C., & Sanchis, J. (Septiembre de 2010). Monitorización y Control de Procesos. Una Visión Teórico-Práctica Aplicada a Invernaderos. Obtenido de Monitorización y Control de Procesos. Una Visión Teórico-Práctica Aplicada a Invernaderos: [https://www.researchgate.net/publication/28141903\\_Monitorizacion\\_y\\_Control\\_de\\_Procesos\\_Una\\_Vision\\_Teorico-Practica\\_Aplicada\\_a\\_Invernaderos](https://www.researchgate.net/publication/28141903_Monitorizacion_y_Control_de_Procesos_Una_Vision_Teorico-Practica_Aplicada_a_Invernaderos)
- Molnar, P. (2011). Calibration. Zürich: Institute of Environmental Engineering, Chair of Hydrology and Water Resources Management.
- Pérez, G., García, G., Nocado de León, I., & García, L. (1996). Metodología de la investigación educacional. Obtenido de Metodología de la investigación educacional.
- Programa de Agua Potable y Alcantarillado, P. (Diciembre de 2012). Modelación Hidráulica. Recuperado el 26 de Septiembre de 2018, de Cooperación Bolivia-Alemania: [http://www.bivica.org/upload/ag\\_modelacion.pdf](http://www.bivica.org/upload/ag_modelacion.pdf)
- Rocha F, A. (2012). Hidráulica de tuberías y canales.
- Rondán Galán, E. (2016). Estado del arte de la calibración de modelos hidráulicos. Modelado de fugas con Epanet. Recuperado el 20 de Septiembre de 2018, de <https://idus.us.es/xmlui/bitstream/handle/11441/47948/Estado%20del%20arte%20de%20la%20calibraci3n%20de%20modelos%20hidr3julicos.%20Modelado%20de%20fugas%20con%20Epanet.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Segura S, L. P., & Casasola R, R. A. (2011). Modelación hidráulica para el análisis y propuesta de obras de mitigación de inundaciones en Finca Valle la Estrella. Cartago, Costa Rica.
- Shannon, R. E. (1988). Simulación de Sistemas. Diseño, desarrollo e implementación. México: Trillas.
- simulacionutp. (1 de Octubre de 2016). Simulación de sistemas. Recuperado el 7 de Abril de 2019, de <https://simulacionutp.wordpress.com/2016/10/01/kolmogorov-smirnov/>

- Timbe, L. (2011). Análisis de la vulnerabilidad a eventos de crecida y diseño de obras físicas para la protección de márgenes e infraestructura del río Yanuncay (Estudios de consultoría). Cuenca, Ecuador.
- Torres, E., & González, E. (2010). Aplicación del modelo de simulación hidráulica HEC-RAS para la emisión de pronósticos hidrológicos en tiempo real, en la cuenca media del río Bogotá-sector Alicachin. Bogotá, Colombia.
- Universidad Politécnica de Madrid, U. (2016). Mecánica de Fluidos. Recuperado el 2 de Marzo de 2019, de <http://ocw.upm.es/ingenieria-agroforestal/fisica/contenido/material-de-clase/Tema-7/fluidos.pdf>
- Vivas, G. C. (2004). Análisis del modelaje hidráulico del sistema hídrico del río Chaguana, mediante el uso del modelo HEC-RAS. Guayaquil, Ecuador.

## **ANEXOS**

Anexo 1: Anexo digital, tablas en el software Excel “Análisis de sensibilidad de la calibración del modelo hidráulico en régimen impermanente ante la variación de la n de Manning inicial”

Anexo 2: Anexo digital, tablas en el software Excel “Frentes de Pareto 9\_12MAR2017”

Anexo 3: Anexo digital, tablas en el software Excel “Frentes de Pareto 12\_14ABR2017”

Anexo 4: Anexo digital, documento en el software Word “Guía para calibrar el modelo hidráulico en régimen impermanente”