

**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA**



**ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS HIDRÁULICOS DE LA FORMA DEL
SURCO EN LA FASE DE AVANCE Y RECESO**

JAVIER EDUARDO BERRIOS MORA

PROYECTO DE TÍTULO
PRESENTADO A LA FACULTAD DE
INGENIERÍA AGRÍCOLA DE LA
UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN,
PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL AGRÍCOLA.

CHILLÁN-CHILE

2021

**ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS HIDRÁULICOS DE LA FORMA DEL
SURCO EN LA FASE DE AVANCE Y RECESO**

Aprobado por:

Eduardo Antonio Holzapfel Hoces
Ingeniero Agrónomo, Ph. D.
Profesor Titular/Emérito

Profesor Guía

Camilo Ignacio Souto Escalona
Ingeniero Civil Agrícola, Dr.
Profesor Asistente

Profesor Co-Guía

Nicole Uslar Valle
Ingeniera Civil Agrícola, Ph. D.
Profesora Asistente

Profesora Asesora

Nicole Uslar Valle
Ingeniera Civil Agrícola, Ph. D.
Profesora Asistente

Directora de Departamento

María Eugenia González Rodríguez
Ingeniero Agrónomo, Ph. D.
Profesora Asociada

Decana

AGRADECIMIENTOS

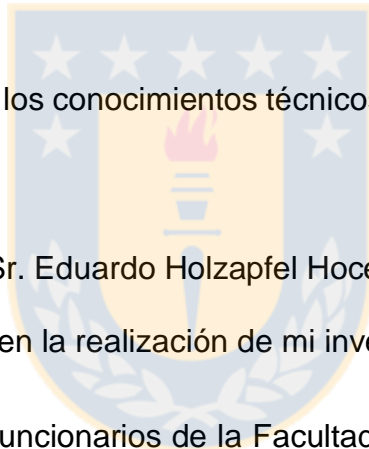
Al Centro de Recursos Hídricos para la Agricultura y Minería (CRHIAM), por otorgarme la beca de pregrado del proyecto ANID/FONDAP/15130015, que hizo posible el desarrollo de esta investigación “Análisis de los parámetros hidráulicos de la forma del surco en la fase de avance y receso”.

Agradezco a la Universidad de Concepción y a la Facultad de Ingeniería Agrícola por brindarme las herramientas necesarias para mi formación profesional.

A mis docentes, por los conocimientos técnicos y valores entregados desde el primer día.

A mi profesor guía Sr. Eduardo Holzapfel Hoces y profesores de comisión por el apoyo entregado en la realización de mi investigación.

A las secretarías y funcionarios de la Facultad por su disposición, amabilidad y alegría entregada durante todos estos años de estudio.



ÍNDICE DE MATERIAS

	Página
RESUMEN.....	1
SUMMARY	3
1. INTRODUCCIÓN.....	5
2. OBJETIVOS	8
2.1 Objetivo general.....	8
2.2 Objetivos específicos.....	8
3. ANTECEDENTES GENERALES	9
3.1 Sistema de riego gravitacional: Surcos.....	9
3.2 Fases del riego por surco.....	9
3.2.1 Fase de avance.....	9
3.2.2 Fase de almacenamiento.....	9
3.2.3 Fase de vaciado.....	10
3.2.4 Fase de receso.....	10
3.3 Factores que influyen en las fases de riego	11
3.3.1 Infiltración	11
3.3.2 Pendiente.....	12
3.3.3 Caudal	12
3.3.4 Rugosidad	13
3.4 Forma de surco.....	15
3.5 Modelos de simulación	16
3.5.1 Hidrodinámico.....	18
3.5.2 Cero inercia	18
3.5.3 Onda cinemática	19
3.5.4 Volumen balance.....	19
4. METODOLOGÍA	21

4.1	Base de datos.....	21
4.2	Datos seleccionados para la simulación.....	21
4.3	Demostración matemática de la determinación de los factores de forma de un surco	22
4.4	Obtención del área de flujo en la cabecera del surco	25
4.5	Determinación de la ecuación de infiltración	26
4.6	Simulación con modelo cinemático Aquasurco.....	27
4.7	Simulación con modelo simple para el avance	32
4.8	Simulación con modelo simple para el receso	33
4.9	Análisis estadístico	36
5.	RESULTADOS.....	37
5.1	Localidad 1: Machette	37
5.1.1	Forma del surco	37
5.1.2	Fases de riego (avance y receso)	42
5.2	Localidad 2: Machette	53
5.2.1	Forma del surco	54
5.2.2	Fases de riego (avance y receso)	59
5.3	Localidad 3: Colorado.....	70
5.3.1	Forma del surco	71
5.3.2	Fases de riego (avance y receso)	76
5.4	Localidad 4: Colorado.....	87
5.4.1	Forma del surco	88
5.4.2	Fases de riego (avance y receso)	93
6.	CONCLUSIONES	105
7.	LITERATURA CITADA	107

ÍNDICE DE TABLAS

	Página
Tabla 1. Factores de forma e hidráulicos del surco para caso en bruto y ajustado con su respectiva área en la localidad de Machette.....	42
Tabla 2. Análisis estadístico para la fase de avance con datos en bruto en la localidad de Machette	51
Tabla 3. Análisis estadístico para la fase de avance con datos ajustados en la localidad de Machette	51
Tabla 4. Análisis estadístico para la fase de receso con datos en bruto en la localidad de Machette	52
Tabla 5. Análisis estadístico para la fase de receso con datos ajustados en la localidad de Machette	52
Tabla 6. Factores de forma e hidráulicos del surco para caso en bruto y ajustado con su respectiva área en la localidad de Machette.....	58
Tabla 7. Análisis estadístico para la fase de avance con datos en bruto en la localidad de Machette	68
Tabla 8. Análisis estadístico para la fase de avance con datos ajustados en la localidad de Machette	68
Tabla 9. Análisis estadístico para la fase de receso con datos en bruto en la localidad de Machette	69
Tabla 10. Análisis estadístico para la fase de receso con datos ajustados en la localidad de Machette	69
Tabla 11. Factores de forma e hidráulicos del surco para caso en bruto y ajustado con su respectiva área en la localidad de Colorado.....	75
Tabla 12. Análisis estadístico para la fase de avance con datos en bruto en la localidad de Colorado.....	85
Tabla 13. Análisis estadístico para la fase de avance con datos ajustados en la localidad de Colorado	85

Tabla 14. Análisis estadístico para la fase de receso con datos en bruto en la localidad de Colorado.....	86
Tabla 15. Análisis estadístico para la fase de receso con datos ajustados en la localidad de Colorado	86
Tabla 16. Factores de forma e hidráulicos del surco para caso en bruto y ajustado con su respectiva área en la localidad de Colorado.....	92
Tabla 17. Análisis estadístico para la fase de avance con datos en bruto en la localidad de Colorado.....	102
Tabla 18. Análisis estadístico para la fase de avance con datos ajustados en la localidad de Colorado	102
Tabla 19. Análisis estadístico para la fase de receso con datos en bruto en la localidad de Colorado.....	103
Tabla 20. Análisis estadístico para la fase de receso con datos ajustados en la localidad de Colorado	103



ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Diagrama esquemático de las fases del riego superficial. Tav = tiempo de avance, Tal = tiempo de almacenamiento, tco = tiempo de corte, Tva = tiempo de vaciado, Tre = tiempo de receso.....	10
Figura 2. Técnica para determinar la geometría del surco pintando el entorno de surco	15
Figura 3. Técnica del perfilómetro para determinar la geometría del surco.....	16
Figura 4. Técnica del travesaño de referencia para determinar la geometría del surco	16
Figura 5. Ejemplo de la forma del surco considerando los antecedentes de ambos lados desde el centro	22
Figura 6. Menú de entrada al iniciar el programa Aquasurco.....	28
Figura 7. Menú de opciones que se pueden realizar con el programa Aquasurco	28
Figura 8. Pantalla de entrada de los datos al módulo de diseño de Aquasurco	29
Figura 9. Pantalla de entrada de geometría del surco	29
Figura 10. Alturas de agua infiltradas en el programa Aquasurco	30
Figura 11. Curvas de la fase de avance y receso entregadas por el programa Aquasurco	31
Figura 12. Resultado del volumen de agua aplicado entregado por el programa Aquasurco	31
Figura 13. Pantalla de la opción mostrar tabla de simulación de Aquasurco	32
Figura 14. Geometría de surco observada en la localidad de Machette con fecha 23 de junio de 1979	38

Figura 15. Forma del surco 1 considerando los antecedentes de ambos lados desde el centro. (a) datos en bruto y (b) datos ajustados.....	39
Figura 16. Forma del surco 3 considerando los antecedentes de ambos lados desde el centro. (a) datos en bruto y (b) datos ajustados.....	40
Figura 17. Forma del surco 5 considerando los antecedentes de ambos lados desde el centro. (a) datos en bruto y (b) datos ajustados.....	41
Figura 18. Curvas de avance y receso para el surco 1 sin F0 a partir de los datos entregados y modelos utilizados. (a) datos en bruto y (b) datos ajustados.....	43
Figura 19. Curvas de avance y receso para el surco 1 con F0 a partir de los datos entregados y modelos utilizados. (a) datos en bruto y (b) datos ajustados.....	44
Figura 20. Curvas de avance y receso para el surco 3 sin F0 a partir de los datos entregados y modelos utilizados. (a) datos en bruto y (b) datos ajustados.....	46
Figura 21. Curvas de avance y receso para el surco 3 con F0 a partir de los datos entregados y modelos utilizados. (a) datos en bruto y (b) datos ajustados.....	47
Figura 22. Curvas de avance y receso para el surco 5 sin F0 a partir de los datos entregados y modelos utilizados. (a) datos en bruto y (b) datos ajustados.....	49
Figura 23. Curvas de avance y receso para el surco 5 con F0 a partir de los datos entregados y modelos utilizados. (a) datos en bruto y (b) datos ajustados.....	50
Figura 24. Geometría de surco observada en la localidad de Machette con fecha 25 de julio de 1979	54
Figura 25. Forma del surco 1 considerando los antecedentes de ambos lados desde el centro. (a) datos en bruto y (b) datos ajustados.....	55
Figura 26. Forma del surco 3 considerando los antecedentes de ambos lados desde el centro. (a) datos en bruto y (b) datos ajustados.....	56

Figura 27. Forma del surco 5 considerando los antecedentes de ambos lados desde el centro. (a) datos en bruto y (b) datos ajustados.....	57
Figura 28. Curvas de avance y receso para el surco 1 sin F0 a partir de los datos entregados y modelos utilizados. (a) datos en bruto y (b) datos ajustados.....	60
Figura 29. Curvas de avance y receso para el surco 1 con F0 a partir de los datos entregados y modelos utilizados. (a) datos en bruto y (b) datos ajustados.....	61
Figura 30. Curvas de avance y receso para el surco 3 sin F0 a partir de los datos entregados y modelos utilizados. (a) datos en bruto y (b) datos ajustados.....	63
Figura 31. Curvas de avance y receso para el surco 3 con F0 a partir de los datos entregados y modelos utilizados. (a) datos en bruto y (b) datos ajustados.....	64
Figura 32. Curvas de avance y receso para el surco 5 sin F0 a partir de los datos entregados y modelos utilizados. (a) datos en bruto y (b) datos ajustados.....	66
Figura 33. Curvas de avance y receso para el surco 5 con F0 a partir de los datos entregados y modelos utilizados. (a) datos en bruto y (b) datos ajustados.....	67
Figura 34. Geometría de surco observada en la localidad de Colorado con fecha 24 de junio de 1977	71
Figura 35. Forma del surco 1 considerando los antecedentes de ambos lados desde el centro. (a) datos en bruto y (b) datos ajustados.....	72
Figura 36. Forma del surco 3 considerando los antecedentes de ambos lados desde el centro. (a) datos en bruto y (b) datos ajustados.....	73
Figura 37. Forma del surco 5 considerando los antecedentes de ambos lados desde el centro. (a) datos en bruto y (b) datos ajustados.....	74
Figura 38. Curvas de avance y receso para el surco 1 sin F0 a partir de los datos entregados y modelos utilizados. (a) datos en bruto y (b) datos ajustados.....	77

Figura 39. Curvas de avance y receso para el surco 1 con F0 a partir de los datos entregados y modelos utilizados. (a) datos en bruto y (b) datos ajustados.....	78
Figura 40. Curvas de avance y receso para el surco 3 sin F0 a partir de los datos entregados y modelos utilizados. (a) datos en bruto y (b) datos ajustados.....	80
Figura 41. Curvas de avance y receso para el surco 3 con F0 a partir de los datos entregados y modelos utilizados. (a) datos en bruto y (b) datos ajustados.....	81
Figura 42. Curvas de avance y receso para el surco 5 sin F0 a partir de los datos entregados y modelos utilizados. (a) datos en bruto y (b) datos ajustados.....	83
Figura 43. Curvas de avance y receso para el surco 5 con F0 a partir de los datos entregados y modelos utilizados. (a) datos en bruto y (b) datos ajustados.....	84
Figura 44. Geometría de surco observada en la localidad de Colorado con fecha 24 de junio de 1977	88
Figura 45. Forma del surco 1 considerando los antecedentes de ambos lados desde el centro. (a) datos en bruto y (b) datos ajustados.....	89
Figura 46. Forma del surco 3 considerando los antecedentes de ambos lados desde el centro. (a) datos en bruto y (b) datos ajustados.....	90
Figura 47. Forma del surco 5 considerando los antecedentes de ambos lados desde el centro. (a) datos en bruto y (b) datos ajustados.....	91
Figura 48. Curvas de avance y receso para el surco 1 sin F0 a partir de los datos entregados y modelos utilizados. (a) datos en bruto y (b) datos ajustados.....	94
Figura 49. Curvas de avance y receso para el surco 1 con F0 a partir de los datos entregados y modelos utilizados. (a) datos en bruto y (b) datos ajustados.....	95
Figura 50. Curvas de avance y receso para el surco 3 sin F0 a partir de los datos entregados y modelos utilizados. (a) datos en bruto y (b) datos ajustados.....	97

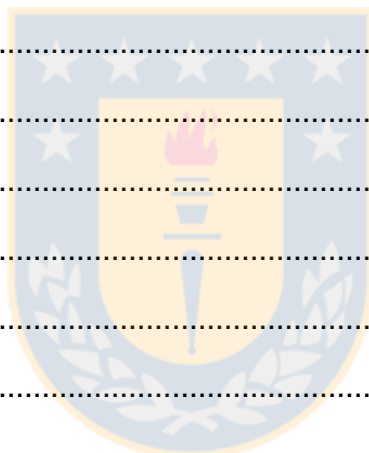
Figura 51. Curvas de avance y receso para el surco 3 con F0 a partir de los datos entregados y modelos utilizados. (a) datos en bruto y (b) datos ajustados.....	98
Figura 52. Curvas de avance y receso para el surco 5 sin F0 a partir de los datos entregados y modelos utilizados. (a) datos en bruto y (b) datos ajustados.....	100
Figura 53. Curvas de avance y receso para el surco 5 con F0 a partir de los datos entregados y modelos utilizados. (a) datos en bruto y (b) datos ajustados.....	101



ÍNDICE DE ECUACIONES

	Página
Ecuación 1	12
Ecuación 2	12
Ecuación 3	13
Ecuación 4	14
Ecuación 5	17
Ecuación 6	17
Ecuación 7	18
Ecuación 8	19
Ecuación 9	20
Ecuación 10	23
Ecuación 11	23
Ecuación 12	23
Ecuación 13	23
Ecuación 14	23
Ecuación 15	23
Ecuación 16	23
Ecuación 17	24
Ecuación 18	24
Ecuación 19	24
Ecuación 20	24
Ecuación 21	24
Ecuación 22	24

Ecuación 23.....	25
Ecuación 24.....	25
Ecuación 25.....	25
Ecuación 26.....	25
Ecuación 27.....	26
Ecuación 28.....	26
Ecuación 29.....	26
Ecuación 30.....	26
Ecuación 31.....	26
Ecuación 32.....	26
Ecuación 33.....	27
Ecuación 34.....	32
Ecuación 35.....	33
Ecuación 36.....	33
Ecuación 37.....	34
Ecuación 38.....	34
Ecuación 39.....	34
Ecuación 40.....	34
Ecuación 41.....	35
Ecuación 42.....	35
Ecuación 43.....	35
Ecuación 44.....	35
Ecuación 45.....	35



ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS HIDRÁULICOS DE LA FORMA DEL SURCO EN LA FASE DE AVANCE Y RECESO

ANALYSIS OF HYDRAULIC PARAMETERS OF THE FURROW SHAPE IN THE ADVANCE AND RECESS PHASE

Palabras claves: Modelos de simulación, riego superficial, Aquasurco.

RESUMEN

Las malas prácticas de manejo y diseño de riego limitan la disponibilidad de agua, por eso las nuevas tecnologías buscan mejorar esta práctica. En los últimos años el gran avance que ha experimentado la computación y el conocimiento creciente de la hidráulica del riego por surcos, han posibilitado la evaluación de modelos físico-matemáticos que permiten estudiar los problemas que afectan a este método de riego, entregando un importante apoyo para el manejo y diseño de riego superficial. El objetivo del estudio fue analizar el efecto de los parámetros hidráulicos de la forma de surco en la fase de avance y receso usando el modelo cinemático Aquasurco®. El análisis se realizó con datos de “Furrow Irrigation Field Evaluation Data” de la Universidad de Colorado, USA. El análisis se desarrolló entorno a la geometría del surco para la determinación de los parámetros de infiltración con el método de los “dos puntos”. Los resultados mostraron que el modelo cinemático Aquasurco tiene una correlación con los datos de campo en la fase de avance y receso con un chi-cuadrado 2.96 y 0.36, RMSE 8.03 y 13.76 min, MAE 6.30 y 12.85 min y NSE 0.88 y -1.49 respectivamente, observándose que el modelo

Aquasurco es apropiado para describir las fases de avance y receso en riego por surcos. Sin embargo, los resultados del modelo en suelos franco arenoso estimaron con menor precisión las fases de avance y receso, debido a los valores erróneos de los parámetros hidráulicos de la forma de surco. El modelo Aquasurco da buenas estimaciones de las fases de riego en surcos cuando los valores de hidráulica de forma se determinan adecuadamente. Para un correcto funcionamiento de los modelos de simulación en surco, su geometría debe ser medida con precisión, evitando y/o corrigiendo errores como las imperfecciones del suelo, ya que alteran los resultados.



ANALYSIS OF HYDRAULIC PARAMETERS OF THE FURROW SHAPE IN THE ADVANCE AND RECESS PHASE

Keywords: Simulation models, surface irrigation, Aquasurco.

SUMMARY

The deficient irrigation management and design practices limit water availability, so new technologies seek to improve this practice. In recent years, the great progress in computer science and the growing knowledge of the hydraulics of furrow irrigation have made possible the evaluation of physical-mathematical models that allow studying the problems that affect this irrigation method, providing an important support for the management and design of surface irrigation. The objective of the study was to analyze the effect of the hydraulic parameters of the furrow shape in the advance and recession phase using the Aquasurco® kinematic wave model. The analysis was performed using data from "Furrow Irrigation Field Evaluation Data" from the University of Colorado, USA. The analysis was developed around the furrow geometry for the determination of infiltration parameters using the "two-point" method. The results showed that the Aquasurco kinematic wave model correlated with the field data in the advance and recession phases with a chi-square 2.96 and 0.36, RMSE 8.03 and 13.76 min, MAE 6.30 and 12.85 min and NSE 0.88 and -1.49 respectively, observing that the Aquasurco model is appropriate to describe the advance and recession phases in furrow irrigation. However, the results of the model in sandy loam soils estimated less accurately the advance

and recession phases, due to the erroneous values of the hydraulic parameters of the furrow shape. The Aquasurco model provides good estimates of the irrigation phases in furrows when the shape hydraulics values are properly determined. For a correct performance of the simulation models in furrow, its geometry must be accurately measured, avoiding and/or correcting errors such as soil imperfections, since they alter the results.



1. INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso natural insustituible que cada vez se hace más escaso, debido a que, a finales del siglo XX, el consumo de agua potable había crecido en una proporción superior al doble de la tasa de crecimiento demográfico mundial (Delgado, 2015). Otro de los factores que implica la escasez de este recurso, es la sobreexplotación de las aguas subterráneas y el uso irresponsable en el riego agrícola, afectando tanto en el presente como en el futuro. En la optimización del uso de agua para riego, es que surgen nuevas tecnologías como la teledetección y el modelamiento, ayudando así a mejorar y racionalizar las prácticas de aplicación del agua.

El riego consiste en la aplicación de agua con el objetivo de brindar un suministro suficiente que permita un buen crecimiento de las plantaciones (Guerra, 2009). Es por esto que existen varios sistemas de riego tanto superficiales como presurizados, los cuales tienen aplicaciones específicas que varían según factores como el cultivo, suelo, disponibilidad y calidad de agua, entre otros. Sin lugar a dudas, los sistemas de riego con diseños, manejos y operaciones óptimas, tendrán los niveles más altos de eficiencia y distribución de agua (Holzapfel *et al.*, 2009).

Los métodos de riego superficiales son los más utilizados en el mundo, entre los que se encuentran el riego por contornos, por bordes y principalmente el riego por surcos que se utiliza para regar cultivos en hileras y huertos (Holzapfel *et al.*, 2010). Últimamente el riego por surcos ha tenido gran

importancia debido al aumento en los costos de energía para el funcionamiento de los sistemas de riego presurizados y la incorporación de la automatización en su operación.

En los últimos años el avance vertiginoso que ha experimentado la computación y el conocimiento creciente de la hidráulica del riego por surcos, han posibilitado el desarrollo de modelos físico-matemáticos que permiten estudiar con mayor precisión muchos de los problemas que afectan a este método de riego.

Los modelos físico-matemáticos que se han desarrollado para el riego superficial son importantes para los propósitos de evaluación y diseño. Estos modelos se clasifican en cuatro grupos principales: modelo hidrodinámico completo; modelo de cero inercia; modelo de onda cinemática y modelo de balance de volumen (Ebrahimian and Liaghat, 2011). La implementación de estos modelos permite a los ingenieros contar con un apoyo importante para el diseño y la operación del sistema de riego por surco, que durante muchos años se han basado en pautas empíricas aproximadas.

Los diferentes modelos que simulan el riego superficial se han desarrollado para representar un evento de riego aislado, suponiendo que no hay variación espacial en los parámetros de campo como infiltración, rugosidad, pendiente y área de la sección transversal (Lima *et al.*, 2014). Estos parámetros son de suma importancia e indispensables al momento de aplicar una simulación, dentro de éstos nos enfocamos en la infiltración, ya que su estimación debe utilizar el método más adecuado para la situación de estudio. Para predecir la

infiltración los modelos empíricos como Kostiakov y Kostiakov-Lewis son los más utilizados (Holzapfel *et al.*, 2004). Además, la mayoría de los modelos que predicen las fases de avance y recesión en el riego superficial utilizan estos modelos.

El propósito de este estudio es evaluar los factores hidráulicos de forma de surco y analizar el comportamiento del modelo cinemático para determinar las fases del riego por surco.



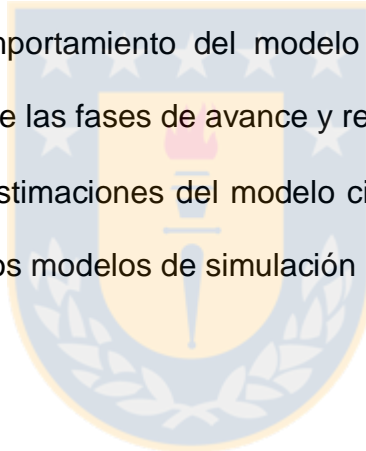
2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

Analizar el efecto de los parámetros hidráulicos de la forma de surco en la fase de avance y receso utilizando el modelo cinemático Aquasurco.

2.2 Objetivos específicos

- Analizar y evaluar el efecto que tienen los parámetros hidráulicos de la forma de surco en la fase de avance y receso.
- Analizar el comportamiento del modelo Aquasurco (cinemático) en la determinación de las fases de avance y receso para riego por surco.
- Comparar las estimaciones del modelo cinemático Aquasurco con datos de terreno y otros modelos de simulación simples para riego por surco.



3. ANTECEDENTES GENERALES

3.1 Sistema de riego gravitacional: Surcos

Este sistema de riego consiste en un set de canales (surcos) diseñados con el fin de que se distribuyan por el cultivo de tal manera que lleven el agua desde la fuente hacia todo el terreno, para lograr esto se deben construir los surcos de tal manera que tengan una óptima pendiente, ya que la gravedad es la encargada de mover en un sentido la trayectoria del agua (Guerra, 2009). De esta forma, el agua en su recorrido se va infiltrando en el suelo, para así alimentar y suplir las necesidades hídricas del cultivo.

3.2 Fases del riego por surco

En el riego por superficie (surco) se pueden identificar cuatro fases durante el desarrollo de un evento de riego

3.2.1 Fase de avance

Ocurre desde el inicio del riego hasta que el frente de agua alcanza el extremo final del surco (Rodríguez, 2007). El tiempo de duración de esta fase se denomina tiempo de avance (T_{av}).

3.2.2 Fase de almacenamiento

Comienza cuando el frente de agua alcanza el extremo final del surco y termina cuando se corta el caudal de riego, permitiendo que al final del surco se infiltre la cantidad de agua requerida (Maldonado, 2007). La duración de esta fase se denomina tiempo de almacenamiento (T_{al}).

3.2.3 Fase de vaciado

Se produce desde el instante en que se corta el caudal de ingreso al surco hasta que el agua desaparece en la cabecera del surco por efecto de la infiltración y gravedad (Rodríguez, 2007). El tiempo que tarda esta fase se conoce como tiempo de vaciado (T_{va}).

3.2.4 Fase de receso

Comienza desde el término de la fase de vaciado hasta que el agua desaparece completamente al final del surco (Rodríguez, 2007). El tiempo transcurrido durante este proceso se conoce como tiempo de receso (T_{re}).

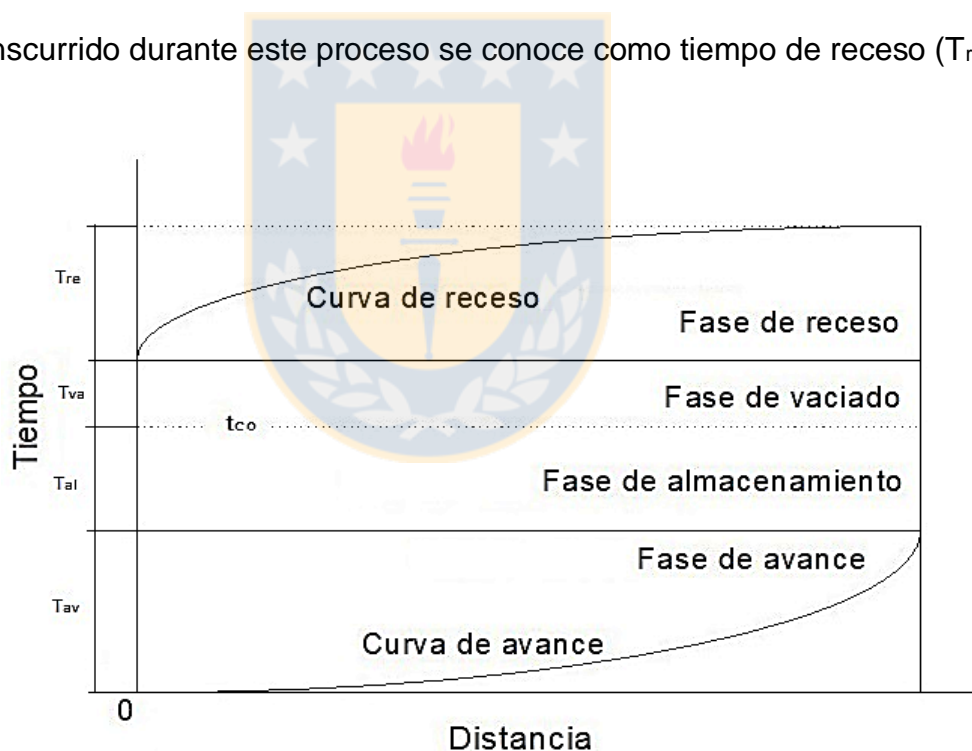


Figura 1. Diagrama esquemático de las fases del riego superficial. T_{av} = tiempo de avance, T_{al} = tiempo de almacenamiento, t_{co} = tiempo de corte, T_{va} = tiempo de vaciado, T_{re} = tiempo de receso. Fuente: Elaboración propia.

Las curvas de avance y receso presentes en la Figura 1, son esenciales para determinar la distribución final del agua infiltrada en el perfil del suelo y el volumen de agua que escurre. La distancia entre estas curvas se define como el tiempo de oportunidad, la cual representa el tiempo de contacto entre el agua y el suelo.

3.3 Factores que influyen en las fases de riego

3.3.1 Infiltración

La infiltración se puede definir como la tasa de penetración del agua en el perfil del suelo cuando la superficie está cubierta de agua. Esto da a entender que, mientras mayor sea la tasa de infiltración, más lento será la fase de avance y más rápida la fase de receso (Koech, Gillies and Smith, 2010). Es por esto que este parámetro se puede considerar de suma importancia en el diseño y evaluación de los sistemas de riego superficial.

Según Holzapfel *et al.* (1988) y Holzapfel *et al.* (2004) la estimación de la infiltración es un factor importante en los estudios de riego y se debe determinar a través de metodologías adecuadas para obtener los coeficientes de los modelos de infiltración, el uso de modelos empíricos de infiltración y su dependencia de las características del suelo.

En general, existen varios modelos empíricos para describir el proceso de infiltración, tales como Kostiakov, Kostiakov-Lewis, Phillip, Green y Ampt, Horton y Hortan-Overton (Al-Azawi, 1985.). Siendo las más usadas en los modelos de simulación las ecuaciones de Kostiakov y Kostiakov-Lewis.

$$I = AT^B \quad [1]$$

$$I = AT^B + F_0T \quad [2]$$

Donde:

I = Volumen de agua infiltrada ($m^3 m^{-1}$).

T = Tiempo que el agua ha estado en contacto con el suelo (min).

A, B = Parámetros de ajuste empíricos.

F_0 = Tasa de infiltración básica en ($m^3 m^{-1} min^{-1}$).

Para determinar los parámetros A y B , surgen varias metodologías, tales como el método del avance, dos puntos, un punto y el surco infiltrómetro. Según Holzapfel *et al.* (2004) los métodos que obtienen mejores resultados son el de los dos puntos y el avance.

3.3.2 Pendiente

Cuando hablamos de pendiente nos referimos a la inclinación que tiene el terreno. La pendiente es uno de los responsables de la velocidad del agua cuando avanza a lo largo del surco. A mayor pendiente menor será el tiempo de avance, pero en esta situación la probabilidad de que ocurra erosión del suelo es alta, por lo que se recomienda que en riego gravitacional por surcos la pendiente no supere el 2%, teniendo como pendiente óptima 0.3% (Schilardi, 2010).

3.3.3 Caudal

El caudal es el volumen de agua transportada en una unidad de tiempo y es un determinante importante en la velocidad de avance del agua en el surco.

Por lo tanto, es necesario controlarlo, ya que al contar con un caudal pequeño el tiempo de avance se prolonga debido a la baja velocidad del agua, produciendo una mayor infiltración (Guerra, 2009). Mientras que, al tener un caudal elevado, se producirá un efecto contrario, que además inducirá a la erosión del suelo.

Debido a esto es necesario la obtención de un caudal máximo no erosivo por surco, que dependerá de la pendiente, expresado por la siguiente ecuación

$$Q_{max} = \frac{0.0063}{s} \quad [3]$$

Donde:

Q_{max} = Caudal máximo no erosivo ($L s^{-1}$).

S = Pendiente del surco ($m m^{-1}$).

También cabe mencionar que el caudal máximo se verá condicionado por la capacidad que tenga el surco, ya que este puede que no tenga el área suficiente para conducir el caudal.

Al dar inicio a la fase de almacenamiento, es decir, cuando el agua llega al final del surco, es necesario reducir el caudal a la mitad o un tercio de Q_{max} .

Esta práctica nos permite disminuir las pérdidas por escorrentía y aprovechar mejor el agua en la zona efectiva de raíces (Maldonado, 2007).

3.3.4 Rugosidad

Este parámetro afecta en el flujo de agua en el riego por surcos, ya que se producen resistencias debido a la irregularidad en la superficie y por el material (vegetación). Todas estas fuerzas actúan en la dirección opuesta al flujo y

reducen su velocidad (Sepaskhah and Bondar, 2002). Los efectos de estas resistencias en el surco se combinan para formar un factor de resistencia denominado coeficiente de rugosidad de Manning (n) (Gilley and Finkner, 1991).

El coeficiente de rugosidad de Manning depende de diferentes factores, como la vegetación e irregularidad en el surco, la pendiente media del fondo del surco y las tasas de entrada de agua (Sepaskhah and Bondar, 2002; Chow, 1959). Estos factores deben considerarse al estimar el valor de n para diseñar el riego por surcos. Según Sepaskhah and Bondar (2002), Mostafazadefard (1982) y Fernández de Córdoba *et al.* (2018) mencionan que este coeficiente varía entre 0.02 y 0.04.

Casi todas las descripciones teóricas del proceso de riego superficial utilizan una estimación de flujo uniforme. La más comúnmente utilizada de estas relaciones se llama ecuación de Manning y se define como

$$Q = \frac{1}{n} S^{1/2} R^{2/3} A \quad [4]$$

Donde:

Q = Caudal de entrada ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$).

n = Coeficiente de rugosidad de Manning.

S = Pendiente del surco (m m^{-1}).

A = Área de flujo (m^2).

R = Radio hidráulico (m).

3.4 Forma de surco

La hidráulica de flujo de cualquier fluido se modifica por la forma del canal, en este caso del surco. Para proporcionar una mejor comprensión de los fenómenos de flujo en el riego por surco, se deben comprender las relaciones entre el caudal, la velocidad del flujo, la pendiente, la forma del surco, las tasas de infiltración, el radio hidráulico y la rugosidad hidráulica (Mostafazadefard, 1982).

Las ecuaciones de geometría del surco que relacionan la profundidad con el área de la sección transversal, el perímetro mojado, el ancho superior y el radio hidráulico, se puede expresar como funciones de tipo potencial (Brown-Manrique *et al.*, 2019; Karmeli, 1978; Mostafazadefard, 1982).

Para poder determinar la geometría del surco se pueden utilizar diferentes técnicas como pintar el entorno del surco (Figura 2), utilizar un perfilómetro (Figura 3) o utilizar un travesaño de referencia (Figura 4).



Figura 2. Técnica para determinar la geometría del surco pintando el entorno de surco. Fuente: Holzapfel (2020b).



Figura 3. Técnica del perfilómetro para determinar la geometría del surco.
Fuente: Holzapfel (2020b).

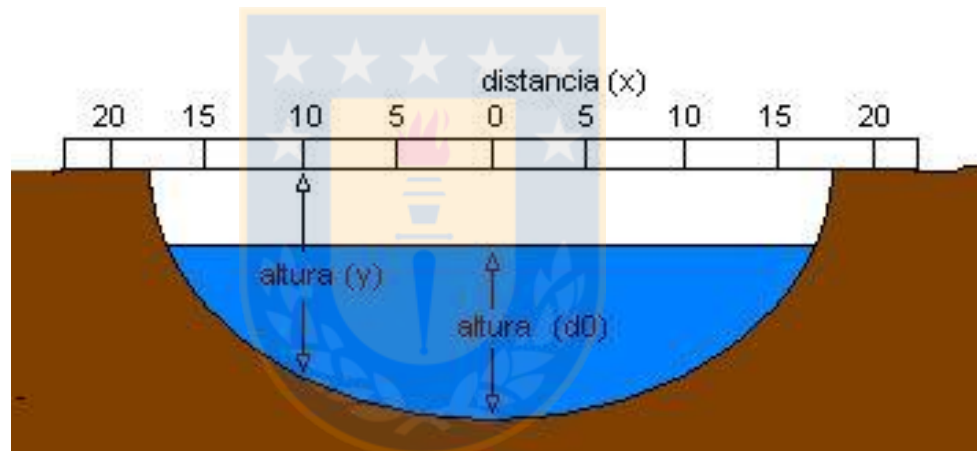


Figura 4. Técnica del travesaño de referencia para determinar la geometría del surco. Fuente: Holzapfel (2020b).

3.5 Modelos de simulación

Los modelos de simulación se basan en las ecuaciones que describen los procesos que gobiernan el flujo superficial, el cual es espacialmente variado al igual que la infiltración en el riego superficial (Ricciardi, 2006). Las ecuaciones hidrodinámicas utilizadas en los modelos de simulación para describir el flujo en el riego superficial son las ecuaciones de conservación de masa y

momento, conocidas como ecuaciones de Saint Venant (Chow, 1959; Walker and Skogerboe, 1987; Koech, Gillies and Smith, 2010).

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} + I_x = 0 \quad [5]$$

$$\frac{\partial V}{g \partial t} + \frac{V \partial V}{g \partial x} + \frac{\partial y}{\partial x} = S_0 - S_y + \frac{I_x V}{2gA} \quad [6]$$

Donde:

Q = Caudal del fluido ($\text{m}^3 \text{min}^{-1}$).

A = Área de flujo (m^2).

I_x = Tasa de infiltración ($\text{m}^3 \text{m}^{-1} \text{min}^{-1}$).

g = Aceleración de gravedad (m min^{-2}).

V = Velocidad del flujo de agua (m min^{-1}).

t = Variable dependiente del tiempo.

x = Variable independiente del espacio.

y = Profundidad de flujo (m).

S_0 = Pendiente del canal o surco (m m^{-1}).

S_y = Pendiente de flujo de agua (m m^{-1}).

Los modelos físico-matemáticos difieren principalmente en términos de los métodos de solución y las condiciones de borde utilizadas. La ecuación de momento a menudo se simplifica y en algunos casos, se ignora por completo para reducir las dificultades del proceso de cálculo. Dependiendo del grado de las simplificaciones, los modelos se pueden agrupar en orden decreciente de

complejidad en: hidrodinámico, cero inercia, onda cinemática y volumen balance (Ebrahimian and Liaghat, 2011; Becerra and Tafur, 2006).

3.5.1 Hidrodinámico

El modelo de simulación hidrodinámico es el más complejo y preciso, utilizando en su totalidad las ecuaciones de Saint-Venant, es decir, ambas ecuaciones de conservación de masa y momento. Estos modelos, si se implementan correctamente, deberían proporcionar simulaciones más precisas en comparación con los otros modelos matemáticos (Ebrahimian and Liaghat, 2011). Debido a su precisión, a menudo se utilizan para la calibración y evaluación de modelos más simples.

3.5.2 Cero inercia

Los modelos de cero inercia son una forma simplificada del modelo hidrodinámico sin los términos de aceleración e inercia. Por esta razón Strelkoff y Katopodes simplificaron las ecuaciones hidrodinámicas al eliminar los términos inerciales en la ecuación de Saint-Venant (Ebrahimian and Liaghat, 2011; Liu *et al.*, 2020). Si se ignoran los términos de inercia, la Ecuación 6 puede ser escrita como:

$$\frac{\partial y}{\partial x} = S_0 - S_y \quad [7]$$

Al realizar esta simplificación las soluciones numéricas para este modelo resultan ser menos complejas y por lo tanto requieren una menor capacidad de computación para simular un evento de riego.

3.5.3 Onda cinemática

El gradiente de profundidad del flujo ($\partial y/\partial x$) y los términos inerciales de la ecuación del momento son a menudo pequeños en comparación con los de las pendientes del surco y del flujo de agua (Ebrahimian and Liaghat, 2011; Liu *et al.*, 2020). Es por esto que el modelo cinemático simplifica aún más la ecuación de Saint- Venant, asumiendo que el gradiente de profundidad y los términos inerciales son despreciables, así la Ecuación 6 puede ser escrita como:

$$S_0 = S_y \quad [8]$$

Esta aproximación simplifica enormemente la solución numérica de la ecuación de momento y por lo tanto requieren menor capacidad de computación para simular un evento de riego en comparación a los otros modelos más complejos.

3.5.4 Volumen balance

Este modelo se aplica principalmente a la fase de avance, donde no considera la ecuación de momento y se basa en el principio de conservación de la masa y en el supuesto de una profundidad de flujo normal en el extremo aguas arriba del surco. El avance del frente de agua se puede predecir mediante el enfoque de balance de volumen en borde y surco utilizando la siguiente ecuación (Ebrahimian and Liaghat, 2011)

$$Q_0 t_x = \int_0^x A(x, t) dx + \int_0^x Z(x, t) dx \quad [9]$$

Donde:

Q_0 = Caudal de entrada ($\text{m}^3 \text{min}^{-1}$).

t_x = Tiempo de avance (min).

$A(x, t)$ = Área de la sección transversal del flujo superficial que varía según la distancia (x) y el tiempo (t).

$Z(x, t)$ = Área de la sección transversal del agua infiltrada que varía según la distancia (x) y el tiempo (t).



4. METODOLOGÍA

4.1 Base de datos

La base de datos utilizados en el estudio corresponde a los antecedentes de Furrow Irrigation Field Evaluation Data del Departamento de Agricultura e Ingeniería Química de la Universidad de Colorado (Elliott, 1980) que considera datos de avance, receso, caudal, pendiente, geometría de surco, entre los más destacados en riego por surco en diferentes localidades. Las localidades de estudio para este proyecto corresponden a cuatro (4), las cuales tienen una muestra representativa de tres surcos cada una, dando un total de 12 muestras para analizar.

4.2 Datos seleccionados para la simulación

Para comenzar con la evaluación y análisis del modelo, fueron necesarios una serie de datos que están presentes en cada una de las localidades de estudio, estos datos se traspasaron a una planilla Excel. Entre estos datos seleccionados, se encuentra el largo del surco, pendiente, tiempo y distancia de avance y receso, el flujo de entrada y salida de agua, la geometría a lo largo del surco y la altura de agua presente a lo largo del surco. Estos datos permiten calcular la infiltración y los parámetros hidráulicos de forma de surco.

Las siguientes metodologías se evaluaron tanto para los datos de geometría de surco en bruto como ajustados, cuando se considera datos en bruto se hace referencia a todos los datos presentes, en cambio al establecer datos ajustados se entiende que se eliminaron datos atípicos que pueden influir al

momento de obtener resultados, teniendo como criterio el descarte de los puntos en cero y aquellos que se encuentren alejados de la representación tipo potencial, debido a posibles terrones de suelo u otra imperfección.

4.3 Demostración matemática de la determinación de los factores de forma de un surco

Para obtener los parámetros hidráulicos de la forma de surco, es necesario conocer la geometría de éste, los cuales al graficarlos por lo general tienen una forma parabólica. Si bien pueden existir algunos puntos que no sigan esta forma, es posible que se deban a imperfecciones en la sección medida.

Se graficaron los puntos obtenidos considerando como referencia o distancia cero el centro del surco, las dos medidas hacia ambos lados fueron graficadas en un solo sentido tal como se muestra en la Figura 5.

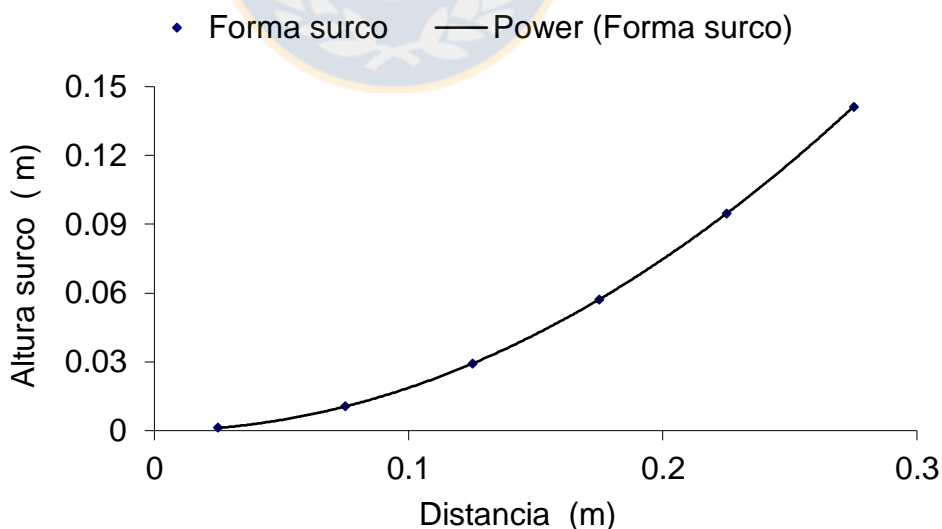


Figura 5. Ejemplo de la forma del surco considerando los antecedentes de ambos lados desde el centro. Fuente: Holzapfel (2020b).

De esta forma se pudo establecer una representación de tipo potencial, tal como lo menciona Brown-Manrique *et al.* (2019), Karmeli (1978), Mostafazadefard (1982). Este procedimiento fue desarrollado por Holzapfel (2020b), el cual se muestra a continuación:

$$y = a x^b \quad [10]$$

Pero para integrar el área bajo la curva y obtener el área de flujo la variable dependiente debe ser x , de esta manera se tiene:

$$x = \left[\frac{1}{a} \right]^{\frac{1}{b}} y^{\frac{1}{b}} \quad [11]$$

De la Ecuación 11 se puede decir que:

$$c = \left[\frac{1}{a} \right]^{\frac{1}{b}} \quad [12]$$

$$d = \frac{1}{b} \quad [13]$$

Entonces la ecuación resultante queda expresada como:

$$x = c y^d \quad [14]$$

Donde:

y = Altura del surco (m).

x = Distancia desde el punto de referencia (m).

a, b, c, d = Constantes empíricas.

Al considerar ambos lados del surco se obtiene que:

$$B = 2 c y^d \quad [15]$$

Por lo tanto, el área bajo la curva será

$$A = 2 \int_0^y x dy = 2 \int_0^y c y^d dy \quad [16]$$

Resolviendo la integral, la ecuación resultante que representa al área de la sección transversal del surco es

$$A = \frac{2c}{d+1} y^{d+1} \quad [17]$$

Al considerar que:

$$E_1 = \frac{2c}{d+1} \quad [18]$$

$$E_2 = d + 1 \quad [19]$$

Entonces la Ecuación 17 que expresa el área de la sección transversal del surco puede ser descrita como:

$$A = E_1 y^{E_2} \quad [20]$$

donde E_1 y E_2 representan a los factores de forma del surco (adimensionales).

Por otro lado, el perímetro mojado tiene la misma tendencia de tipo potencial y se puede expresar como:

$$WP = G_1 y^{G_2} \quad [21]$$

Además, se ha establecido que el perímetro mojado se puede determinar como

$$WP = \sqrt{(2c y^d)^2 + y^2} \quad [22]$$

Donde:

WP = Perímetro mojado (m).

G1, G2 = Constantes empíricas.

Usando la relación hidráulica de canales de la ecuación de Manning, separando sus términos geométricos y elevando al cuadrado se obtiene la siguiente relación hidráulica de forma

$$\frac{Q^2 n^2}{S} = A^2 R^{4/3} \quad [23]$$

Donde:

Q = Caudal de entrada ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$).

n = Coeficiente de rugosidad de Manning.

S = Pendiente del surco (m m^{-1}).

A = Área de flujo (m^2).

R = Radio hidráulico (m).

De esta manera el factor de forma de surco queda representado como:

$$A^2 R^{4/3} = F_1 A^{F_2} \quad [24]$$

donde F_1 y F_2 son los parámetros hidráulicos de forma de surco (adimensionales). Los valores de F_1 y F_2 se obtienen mediante las siguientes ecuaciones

$$F_1 = \frac{E_1^{\frac{10}{3}} - F_2}{G_1^{\frac{4}{3}}} \quad [25]$$

$$F_2 = \frac{2E_2 + \frac{4}{3}E_2 - \frac{4}{3}G_2}{E_2} \quad [26]$$

4.4 Obtención del área de flujo en la cabecera del surco

En cuanto a este punto se calculó el área de flujo a partir de la relación caudal-área presente en el desarrollo de la ecuación de Manning. Al reemplazar la Ecuación 24 en Ecuación 23, se obtiene la relación entre el flujo y el área por medio de los parámetros hidráulicos de forma de surco, tal como lo presenta Schilardi (2010), para posteriormente despejar el área (Ecuación 27)

$$A_o = \left(\frac{Q^2 n^2}{S F_1} \right)^{\frac{1}{F_2}} \quad [27]$$

Donde:

A_o = Área de la sección transversal en la cabecera del surco (m^2).

4.5 Determinación de la ecuación de infiltración

Para obtener los coeficientes de la ecuación de infiltración acumulada, se utilizó el método de los dos puntos. Según Holzapfel *et al.* (2004) y Esfandiari and Maheshwari (1997) este método desarrollado por Elliott and Walker (1982), utiliza la ecuación de Kostiakov-Lewis.

La metodología de los dos puntos considera el siguiente sistema de ecuaciones para determinar los valores de A y B:

$$A = \frac{\alpha(B+1)(r+1)}{(B+r-rB+1)T_L^B} \quad [28]$$

$$B = \frac{\ln(\alpha/\beta)}{\ln(T_L/T_{L/2})} \quad [29]$$

en el cual

$$\alpha = \frac{V_L}{L} - A_{s,L} - \frac{F_0 T_L}{r+1} \quad [30]$$

$$\beta = \frac{V_{L/2}}{L/2} - A_{s,L/2} - \frac{F_0 T_{L/2}}{r+1} \quad [31]$$

$$r = \frac{\ln(0.5)}{\ln(T_{L/2}/T_L)} \quad [32]$$

Donde:

T_L = Tiempo de avance a la distancia L (min).

$T_{L/2}$ = Tiempo de avance a la distancia L/2 (min).

$A_{s,L}$ = Área de la sección transversal del flujo a la distancia L (m^2).

$A_{s,L/2}$ = Área de la sección transversal del flujo a la distancia $L/2$ (m^2).

V_L = Volumen de entrada al surco a la distancia L (m^3).

$V_{L/2}$ = Volumen de entrada al surco a la distancia $L/2$ (m^3).

r = Parámetro de ajuste.

Por lo general $A_{s,L}$ y $A_{s,L/2}$ se obtienen a partir del producto entre el área de la sección transversal en la cabecera (A_0) y un factor de forma de almacenaje que se define como una constante que asume un valor de 0.8 (Morábito, 2003).

Ya que los datos analizados no cuentan con la tasa de infiltración básica (F_0), fue posible determinarlo conociendo el caudal de entrada y el caudal de salida estabilizado considerando el surco como un surco infiltrómetro (Camacho *et al.*, 1997), obteniendo F_0 mediante la siguiente ecuación:

$$F_0 = \frac{Q_0 - Q_s}{L} \quad [33]$$

Donde:

Q_0 = Caudal de entrada ($m^3 \text{ min}^{-1}$).

Q_s = Caudal de salida estabilizado en el surco ($m^3 \text{ min}^{-1}$).

L = Longitud del surco (m).

4.6 Simulación con modelo cinemático Aquasurco

El programa de simulación denominado Aquasurco, utiliza el modelo de onda cinemática para simular un evento de riego por surco.



Figura 6. Menú de entrada al iniciar el programa Aquasurco. Fuente: Elaboración propia.



Figura 7. Menú de opciones que se pueden realizar con el programa Aquasurco. Fuente: Elaboración propia.

Al seleccionar la opción ejecutar programa, se abre una nueva ventana donde se ingresaron los datos de entrada correspondientes para la simulación

Entrada de Datos		
Constante K de I. A.	0,00581	[m3/min/m]
Exponente n de I. A.	0,584	
Constante de Infiltración Básica	0,0001	
Factor de forma surco C1		
Factor de forma surco C2		
Factor hidráulico A1		
Factor hidráulico A2		
Caudal Aplicado (<0.2)	0,066	[m3/min]
Caudal reducido (<0.2)	0,066	[m3/min]
Coefficiente de Manning	0,025	
Pendiente	0,005	[m/m]
Intervalo tiempo avance	2	[min]
Tiempo de corte	90	[min]
Distancia entre surcos	1	[m]
Longitud del surco (<300)	80	[m]
Volumen de agua requerida	0,1	[m3/m]

Análisis del riego	
Volumen total aplicado	[m3]
Volumen infiltrado	[m3]
Volumen percolado	[m3]
Percolación profunda	[%]
Área de percolación	[%]
Volumen escorrentía	[m3]
Escorrentía superficial	[%]
Coefficiente de uniformidad	[%]

Eficiencias	
Aplicación	[%]
Requerimiento	[%]
Distribución déficit	[%]
Distribución requerimiento	[%]
Distribución total	[%]

Sugerencias




Figura 8. Pantalla de entrada de los datos al módulo de diseño de Aquasurco. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 8 se puede apreciar una opción, para calcular los parámetros de forma del surco. Al seleccionar esta opción se abre una nueva ventana, donde se ingresan los datos correspondientes a la geometría del surco (Figura 9).

Parámetros de surco

Mediciones en el surco	
X	Y
0,0001	0,1400
0,0500	0,1270
0,0500	0,1270
0,1000	0,0900
0,1000	0,0900
0,1500	0,0400
0,1500	0,0000
0,2000	0,0000
0,2000	0,0000
0,2500	0,0000

Parámetros de surco	
Factor de forma surco C1	2,127
Factor de forma surco C2	2,055
Factor hidráulico A1	0,227
Factor hidráulico A2	2,651

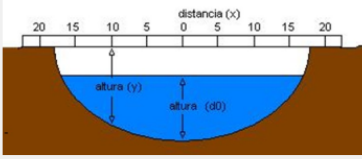


Figura 9. Pantalla de entrada de geometría del surco. Fuente: Elaboración propia.

Cabe mencionar que los datos de geometría del surco deben ser ingresados con la técnica de medición del travesaño, teniendo como referencia la imagen al costado derecho de la Figura 9.

Una vez obtenidos los parámetros hidráulicos de forma de surco y completados los datos de entrada, se dio inicio a la simulación del modelo (en opción correr modelo). Donde se entregan los análisis del riego, eficiencia y sugerencias.

Luego de finalizada la simulación del modelo, se puede volver al menú principal, para ingresar a las opciones restantes. Estas presentan de manera gráfica la simulación realizada, tal como se puede apreciar en las Figuras 10, 11 y 12.

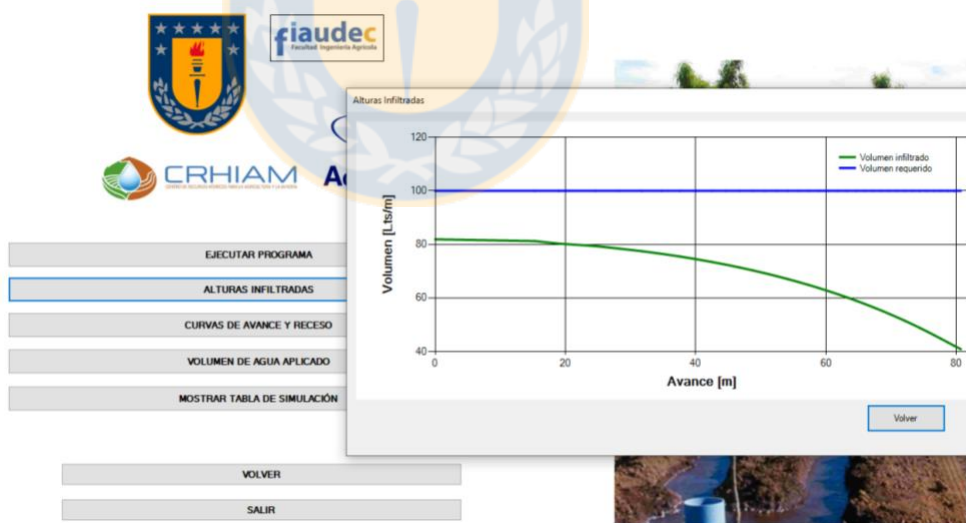


Figura 10. Alturas de agua infiltradas en el programa Aquasurco. Fuente: Elaboración propia.

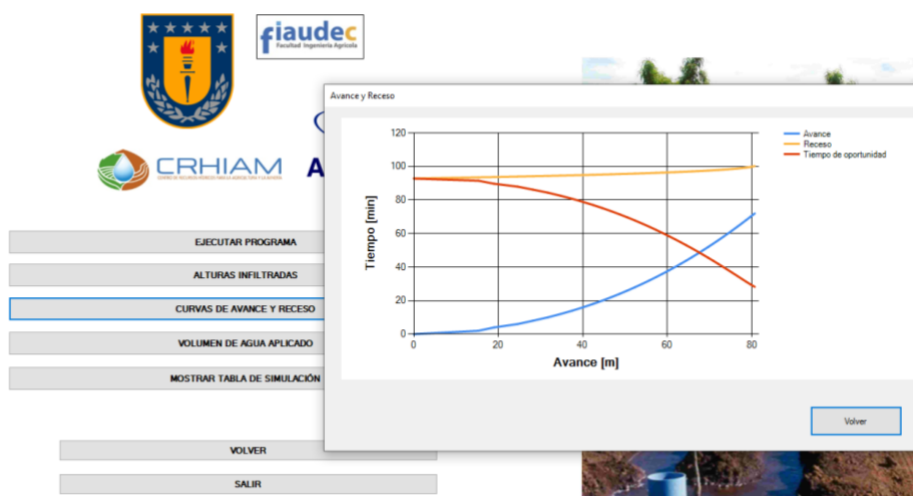


Figura 11. Curvas de la fase de avance y receso entregadas por el programa Aquasurco. Fuente: Elaboración propia.

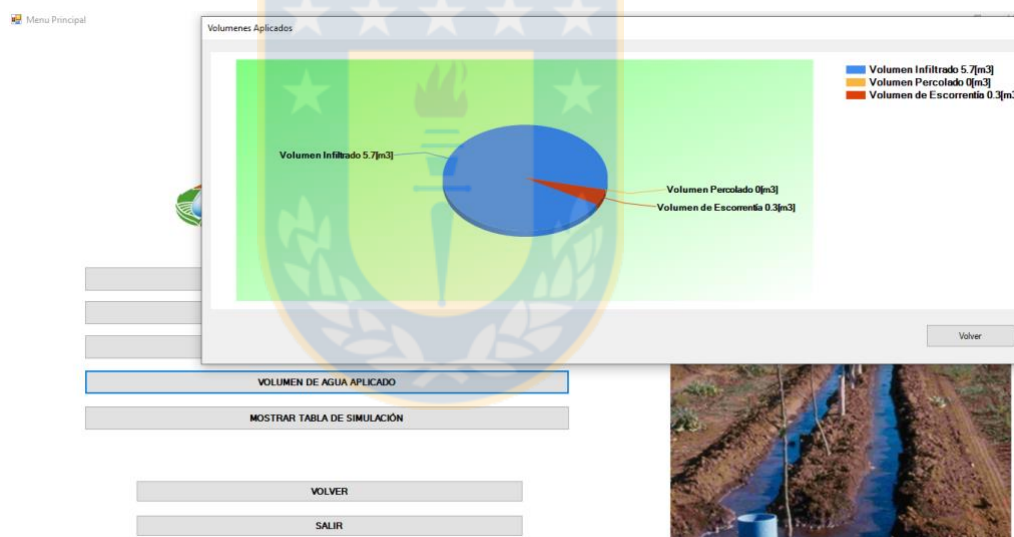


Figura 12. Resultado del volumen de agua aplicado entregado por el programa Aquasurco. Fuente: Elaboración propia.

La última opción otorga la información tabulada referente a la simulación realizada por el programa Aquasurco, la forma y datos que entrega se pueden apreciar en la Figura 13.

N° Nodo	Avance [m]	Tiempo Avance [min]	Tiempo Receso [min]	Tiempo oportunidad [min]	Volumen infiltrado [m³/m]	Volumen requerido [m³/m]
1	0	0	92.84	92.84	0.08	0.1
2	15	2	93.52	91.52	0.08	0.1
3	19	4	93.71	89.71	0.08	0.1
4	25	6	93.99	87.99	0.08	0.1
5	28	8	94.19	86.19	0.08	0.1
6	32	10	94.39	84.39	0.08	0.1
7	35	12	94.56	82.56	0.08	0.1
8	38	14	94.73	80.73	0.08	0.1
9	40	16	94.89	78.89	0.07	0.1
10	42	18	95.05	77.05	0.07	0.1
11	45	20	95.2	75.2	0.07	0.1
12	47	22	95.35	73.35	0.07	0.1
13	49	24	95.49	71.49	0.07	0.1
14	51	26	95.64	69.64	0.07	0.1

Figura 13. Pantalla de la opción mostrar tabla de simulación de Aquasurco.
Fuente: Elaboración propia.

Una vez que se realizó la simulación con este modelo, se obtuvieron los datos de tiempo y distancia tanto de avance como de receso, los cuales son necesarios para efectos de análisis.

4.7 Simulación con modelo simple para el avance

En una formulación unidimensional durante la fase de avance, la ecuación del modelo volumen balance, se puede expresar de la siguiente manera

$$Q_0 t_x = x_A \bar{A} + x_A \bar{I} \quad [34]$$

Donde:

x_A = Distancia de avance hasta el tiempo t (m).

\bar{A} = Área del flujo de la sección transversal promedio (m^2).

\bar{I} = Volumen infiltrado promedio por unidad de longitud ($m^3 m^{-1}$).

Siempre que el flujo continúe, la Ecuación 34 se puede determinar como el modelo de simulación simple de Strelkoff (Hoffman *et al.*, 2007) para el avance, que corresponde a:

$$x_A = \frac{Q_0 t_x}{r_y A_0 + r_z I} \quad [35]$$

donde r_y y r_z corresponden a factores de forma para los perfiles de superficie y subsuperficial respectivamente. El valor asignado a r_y corresponde a una constante de 0,8 (Hoffman *et al.*, 2007).

El factor de forma r_z definido teóricamente por Katopodes y Strelkoff en 1977 para distancias pequeñas desde la punta del perfil de avance, queda representado como:

$$r_z = \frac{1}{1+B} \quad [36]$$

Una vez que se realizó la simulación con este modelo, se obtuvieron los datos de tiempo y distancia de avance, los cuales son necesarios para efectos de análisis.

4.8 Simulación con modelo simple para el receso

Holzapfel *et al.* (1984) indica que Strelkoff en 1977 presentó una solución a la fase de recesión en riego por borde, que se puede extender a riego por surcos usando factores geométricos apropiados. Esta solución supone que, durante la fase de vaciado la altura del flujo de agua es constante y normal a la escorrentía hasta el inicio de la fase de receso.

$$t_{re} = t_R + \left(\frac{S_y}{I_p C^{\frac{3}{2}}} \right) \left[R_{rec} \left(C^{\frac{3}{2}} L \right) - R_{rec} \left(C^{\frac{3}{2}} l \right) \right] \quad [37]$$

Donde:

R_{rec} = Relación de receso.

t_{re} = Tiempo de receso (min).

$$t_R = t_{co} + \left(\frac{A_0 0.8 L}{2 Q_0} \right) \quad [38]$$

Donde:

t_R = Tiempo de riego (min).

t_{co} = Tiempo de corte (min).

$$S_y = \frac{y_1}{L} \quad [39]$$

Donde:

S_y = Pendiente del flujo de agua ($m \ m^{-1}$).

y_1 = Altura de agua al final del surco (m).

L = Largo total del surco (m).

$$I_p = \frac{I_{(t_R)} + I_{(t_R - t_f)}}{2} \quad [40]$$

Donde:

I_p = Velocidad de infiltración promedio en el surco ($m \ min^{-1}$).

$I_{(t_R)}$ = Velocidad de infiltración al tiempo de riego ($m \ min^{-1}$).

$I_{(t_R - t_f)}$ = Velocidad de infiltración al tiempo de riego menos el tiempo que demora el agua en llegar al final del surco ($m \ min^{-1}$).

$$\rho = C^{\frac{3}{2}} l \quad [41]$$

donde ρ es gama y l es la distancia desde el final del surco hasta el punto a medir (m).

$$C = \frac{C_u S_0^{\frac{1}{2}} S_y^{\frac{5}{3}}}{n I_p} \quad [42]$$

Donde:

C_u = Coeficiente que toma el valor de 1 para el sistema métrico y distinto de 1 para el sistema inglés.

n = Coeficiente de rugosidad de Manning.

I_p = Velocidad de infiltración promedio en el surco ($m s^{-1}$).

S_0 = Pendiente del canal o surco (m).

$$R_{rec}(u) = \int_0^u \frac{d\rho}{1+\rho^{2/3}} \quad [43]$$

Este argumento ha recibido una solución numérica y gráfica. Sin embargo, se le puede dar una solución analítica matemática desarrollada por Holzapfel (2020a), dando como resultado:

$$R_{rec}(u) = \int_0^u \frac{d\rho}{1+\rho^{2/3}} = 3\rho^{1/3} - 3 \tan^{-1}(\rho^{1/3}) \quad [44]$$

Reemplazando la Ecuación 41 en 44 se tiene finalmente

$$R_{rec}(u) = 3 \left(C^{\frac{3}{2}} l \right)^{1/3} - 3 \tan^{-1} \left(\left(C^{\frac{3}{2}} l \right)^{1/3} \right) \quad [45]$$

Con el argumento de la \tan^{-1} en radianes.

Una vez que se realizó la simulación con este modelo, se obtuvieron los datos de tiempo y distancia de receso, los cuales son necesarios para efectos de análisis.

4.9 Análisis estadístico

Posterior a las simulaciones realizadas con los diferentes modelos utilizados, se compararon los datos de tiempo y distancia tanto de avance como de receso entregados por Furrow Irrigation Field Evaluation Data del Departamento de Agricultura e Ingeniería Química de la Universidad de Colorado (Elliott, 1980) con los tiempos y distancias que se obtuvieron a partir de los modelos. Esta comparación se evaluó a través en un análisis estadístico.

Existen varias técnicas estadísticas utilizadas para evaluar los modelos matemáticos/físicos, dentro de los cuales se encuentran: coeficiente de determinación (R^2), el coeficiente de Nash-Sutcliffe o de eficiencia (NSE), el error cuadrático medio (RMSE), el error absoluto promedio (MAE) y Chi-cuadrado (χ^2). Estos indicadores son de uso común para evaluación de modelos (Legates and McCabe, 1999; Pushpalatha et al., 2012).

5. RESULTADOS

A partir de los antecedentes extraídos de Furrow Irrigation Field Evaluation Data del Departamento de Agricultura e Ingeniería Química de la Universidad de Colorado (Elliott, 1980), fue posible obtener los siguientes resultados.

5.1 Localidad 1: Machette

Los antecedentes utilizados para el análisis en esta localidad consideran un suelo de tipo franco a franco arcillosa, el cual ya presenta 2 sucesos de riego, con una pendiente de $0,0092 \text{ m m}^{-1}$ y un largo de surco de 450 m.

5.1.1 Forma del surco

Se observa en la Figura 14, que las geometrías de los surcos medida tuvieron una forma triangular para los surcos 3 y 5, y una forma parabólica para el surco 1. También son visibles las imperfecciones del terreno al momento de medir la geometría, teniendo como ejemplo más claro la que se encuentra en el surco 5, esto puede deberse a posibles terrones de suelo. Es por ello que se realizó el ajuste de las geometrías.

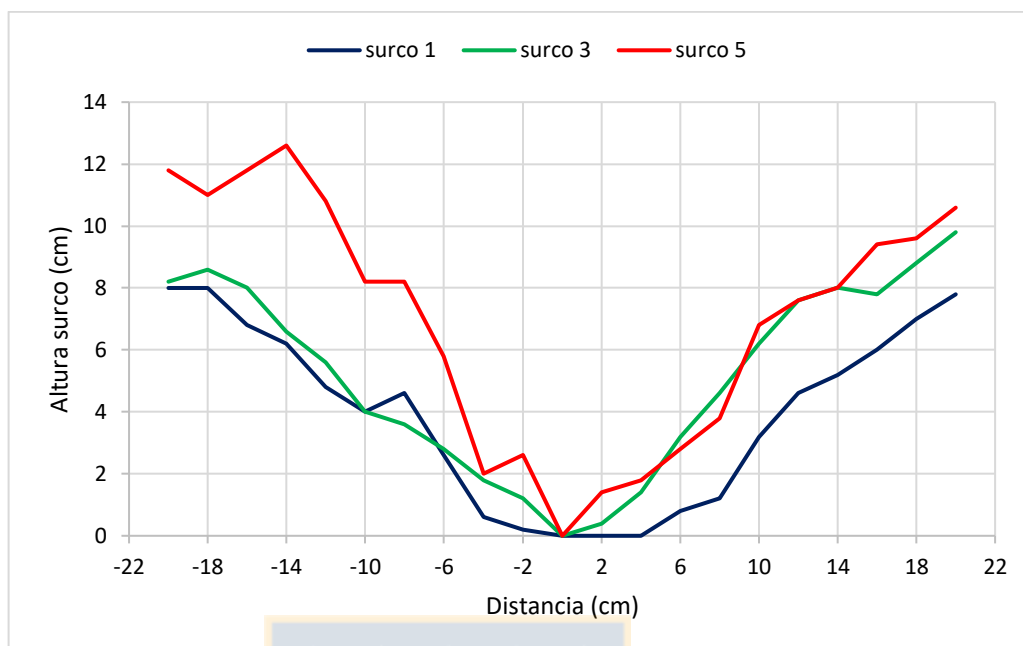


Figura 14. Geometría de surco observada en la localidad de Machette con fecha 23 de junio de 1979. Fuente: Elaboración propia.

Siguiendo la metodología para la determinación de los factores de forma del surco, se obtuvo la representación de tipo potencial para cada surco, tal como lo menciona Brown-Manrique *et al.* (2019), Karmeli (1978), Mostafazadefard (1982). En las Figuras 15, 16, 17 se muestra esta representación de tipo potencial.

En la Figura 15(a) se puede observar una deficiente correlación (R^2) entre los datos y la ecuación de tipo potencial, tendiendo más a una línea recta y un tanto achatada. Por el contrario, al realizar un ajuste de los datos la Figura 15(b) muestra una alta correlación con un R^2 de 0,94 tendiendo a ser una semi-parábola, tal como se puede observar en terreno.

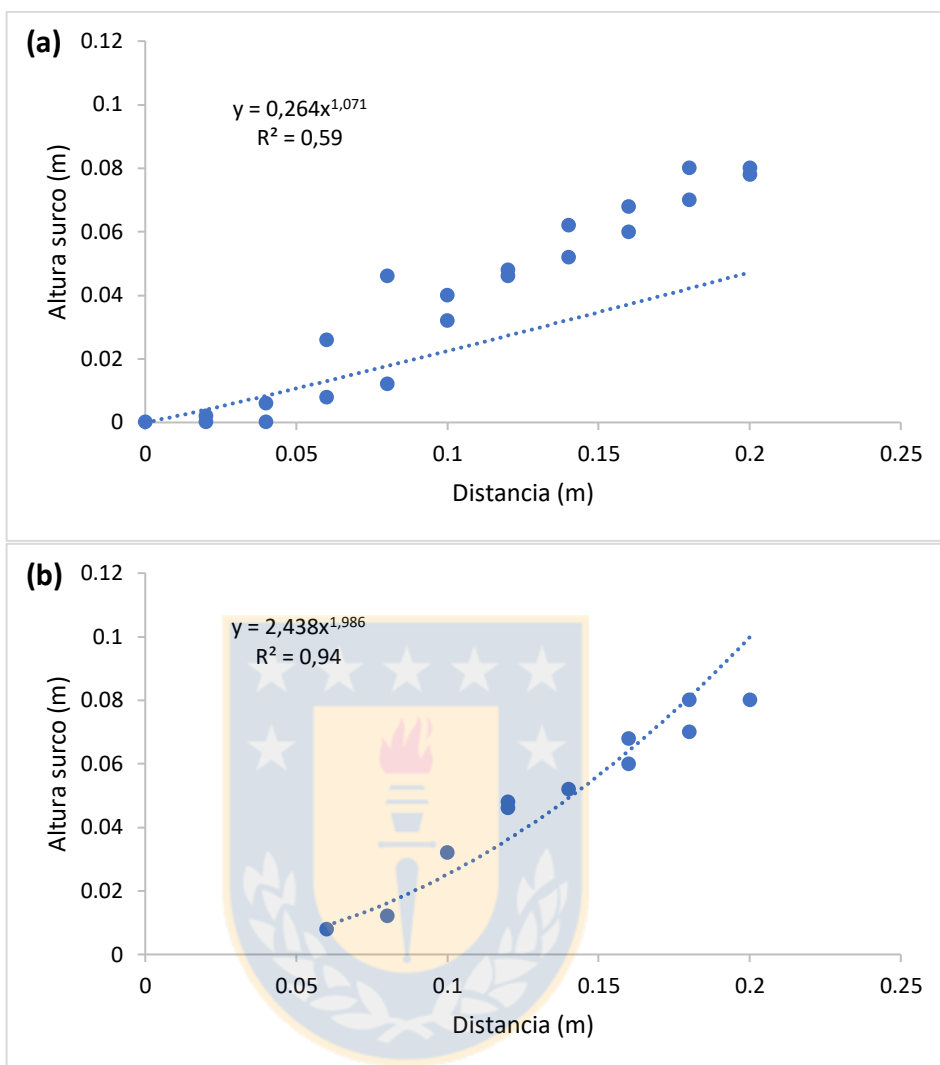


Figura 15. Forma del surco 1 considerando los antecedentes de ambos lados desde el centro. (a) datos en bruto y (b) datos ajustados. Fuente: Elaboración propia.

Tanto para las Figuras 16(a) y 16(b) se puede observar un alto grado de correlación entre los datos y la ecuación de tipo potencial. Sin embargo, en el primer caso se logran distinguir algunos puntos lejanos a la representación potencial, provocando una leve curvatura hacia abajo. Mientras que en el segundo caso al realizar el ajuste de estos puntos se logra una leve curvatura hacia arriba, tendiendo a la forma que mejor representa al surco.

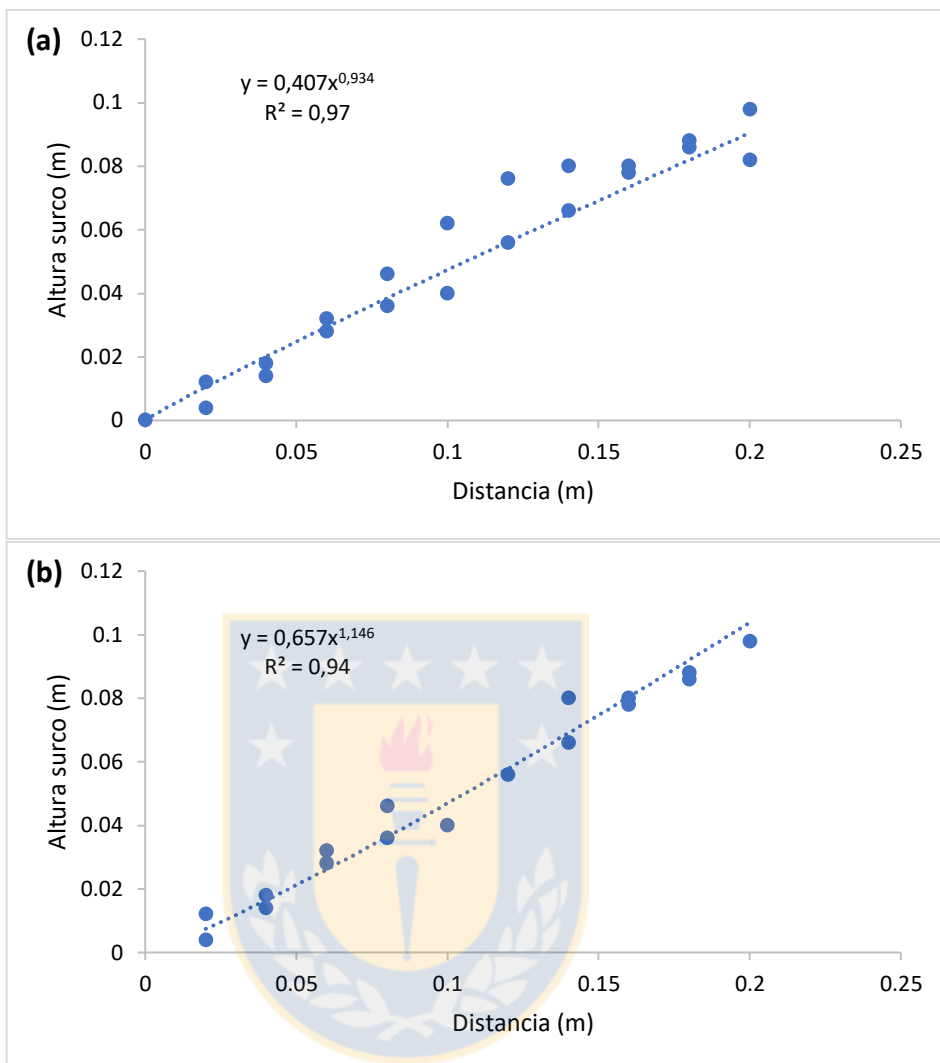


Figura 16. Forma del surco 3 considerando los antecedentes de ambos lados desde el centro. (a) datos en bruto y (b) datos ajustados. Fuente: Elaboración propia.

Las Figuras 17(a) y 17(b) siguen el mismo comportamiento que en la Figura 16(a) y 16 (b) respectivamente, donde se puede observar un alto grado de correlación. Así como también las imperfecciones en el primer caso, originando una leve curvatura hacia abajo y en el segundo caso una leve curvatura hacia arriba, tendiendo a la forma que mejor representa al surco.

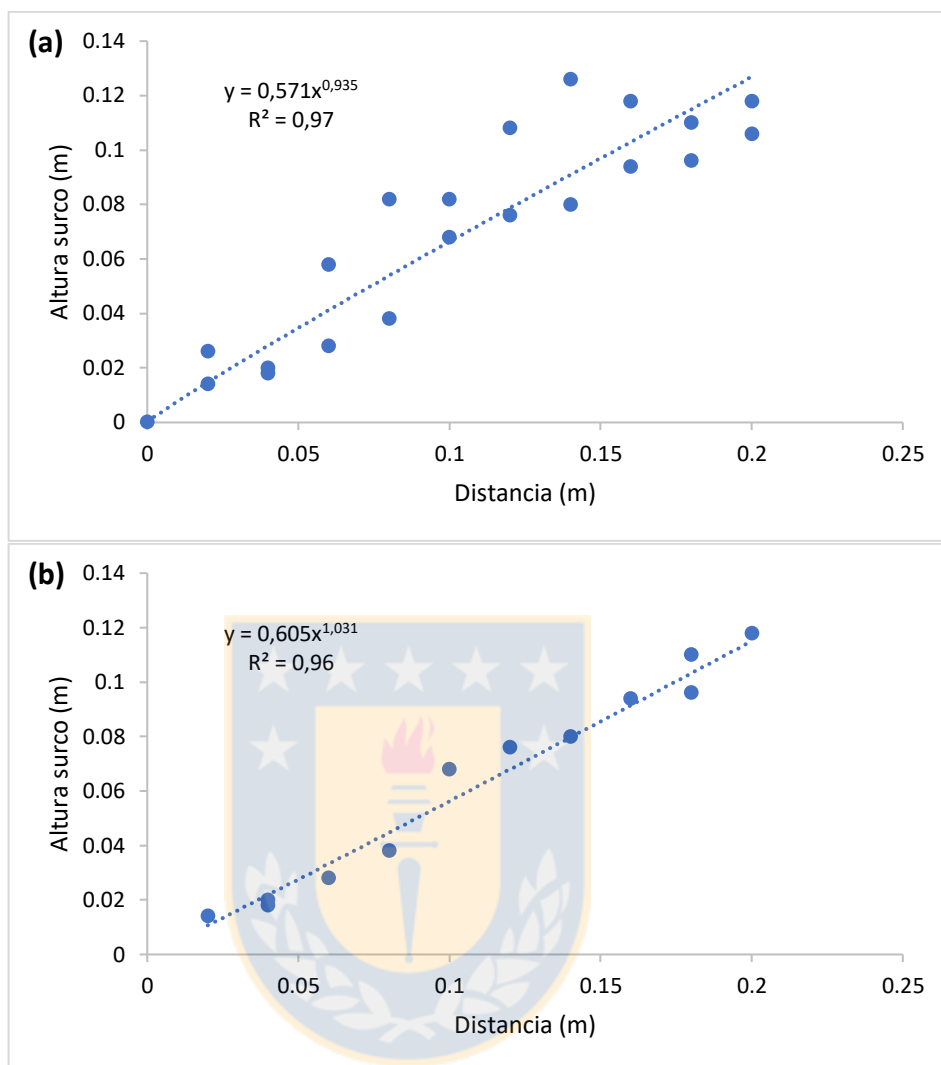


Figura 17. Forma del surco 5 considerando los antecedentes de ambos lados desde el centro. (a) datos en bruto y (b) datos ajustados. Fuente: Elaboración propia.

Utilizando desde la ecuación 10 hasta la ecuación 27, se obtuvieron los factores de forma e hidráulicos del surco, así como también el área de éstos. En la Tabla 1 se entrega un resumen de estos factores para cada caso específico en esta localidad.

Tabla 1. Factores de forma e hidráulicos del surco para caso en bruto y ajustado con su respectiva área en la localidad de Machette.

Surco	Caso	E_1	E_2	F_1	F_2	Área (m ²)
1	b	3,5826	1,9341	0,1701	2,6888	0,00386
	a	0,8492	1,5046	0,6347	2,8791	0,00353
3	b	2,5325	2,0710	0,2037	2,6464	0,00327
	a	1,5419	1,8727	0,3005	2,7079	0,00322
5	b	1,7584	2,0695	0,2522	2,6493	0,00364
	a	1,6526	1,9695	0,2720	2,6755	0,00374

Como se puede observar en la Tabla 1 los factores presentan leves variaciones, siendo el factor E_1 en el surco 1 el que tiene una variación mayor.

Estos factores se encuentran dentro de un rango aceptable, ya que al momento de obtener el área esta no presenta mayor cambio en su dimensión.

5.1.2 Fases de riego (avance y receso)

En la Figura 18 y 19 se observó que las curvas de avance obtenidas por el modelo Aquasurco y el modelo de avance simple, representan de buena forma lo determinado por los datos de terreno, pero aun así se observaron algunas diferencias entre éstas, producido por la variación entre las Ecuaciones 1 y 2.

En cuanto a la curva de receso, se logró distinguir una gran representación de los modelos a lo largo del surco, pero en los últimos 25 metros tienden a alejarse las curvas modeladas de los datos de terreno.

Cabe mencionar que para este caso no se observa una clara diferencia entre las curvas obtenidas a partir de los datos en bruto y los datos ajustados.

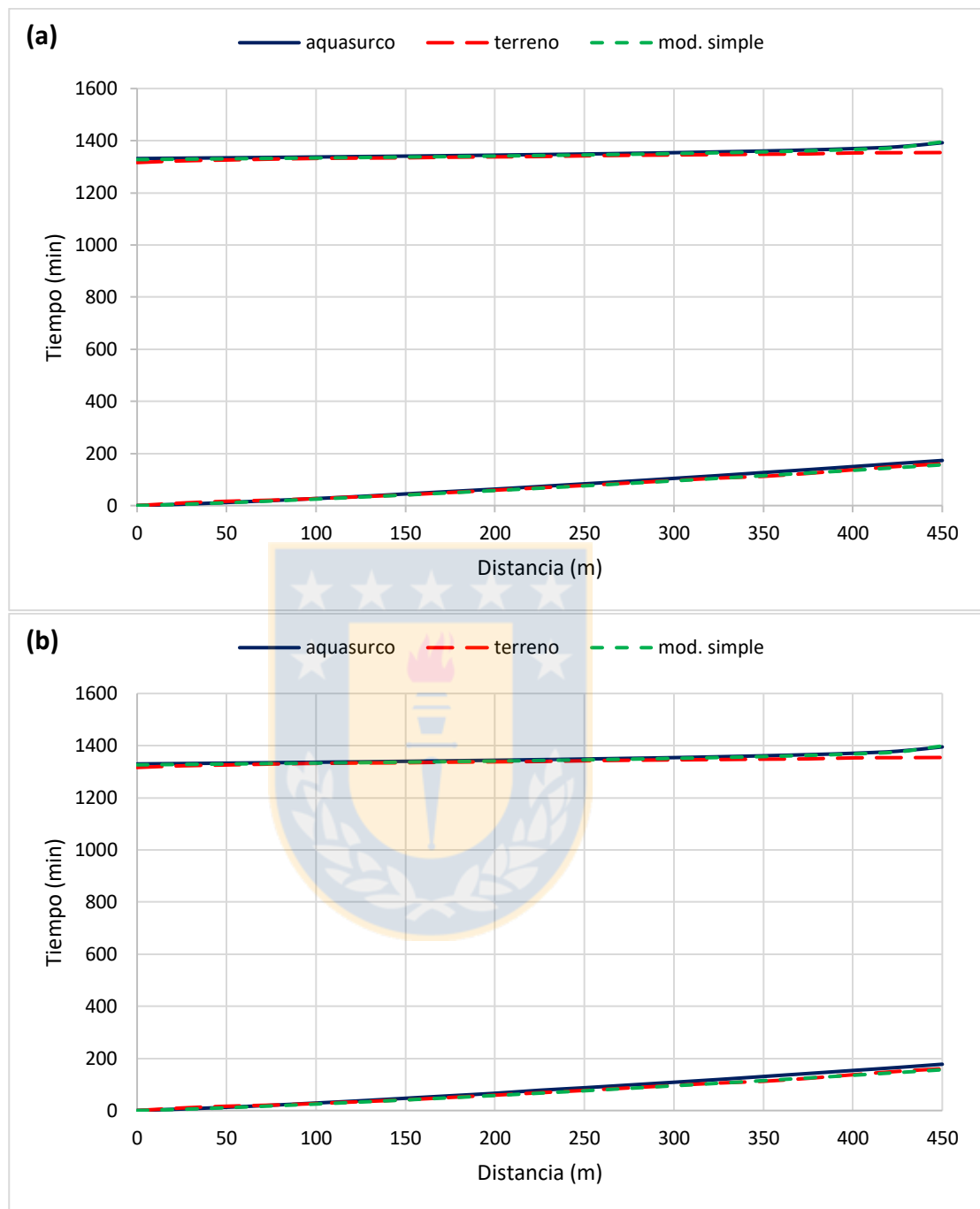


Figura 18. Curvas de avance y receso para el surco 1 sin F0 a partir de los datos entregados y modelos utilizados. (a) datos en bruto y (b) datos ajustados. Fuente: Elaboración propia.

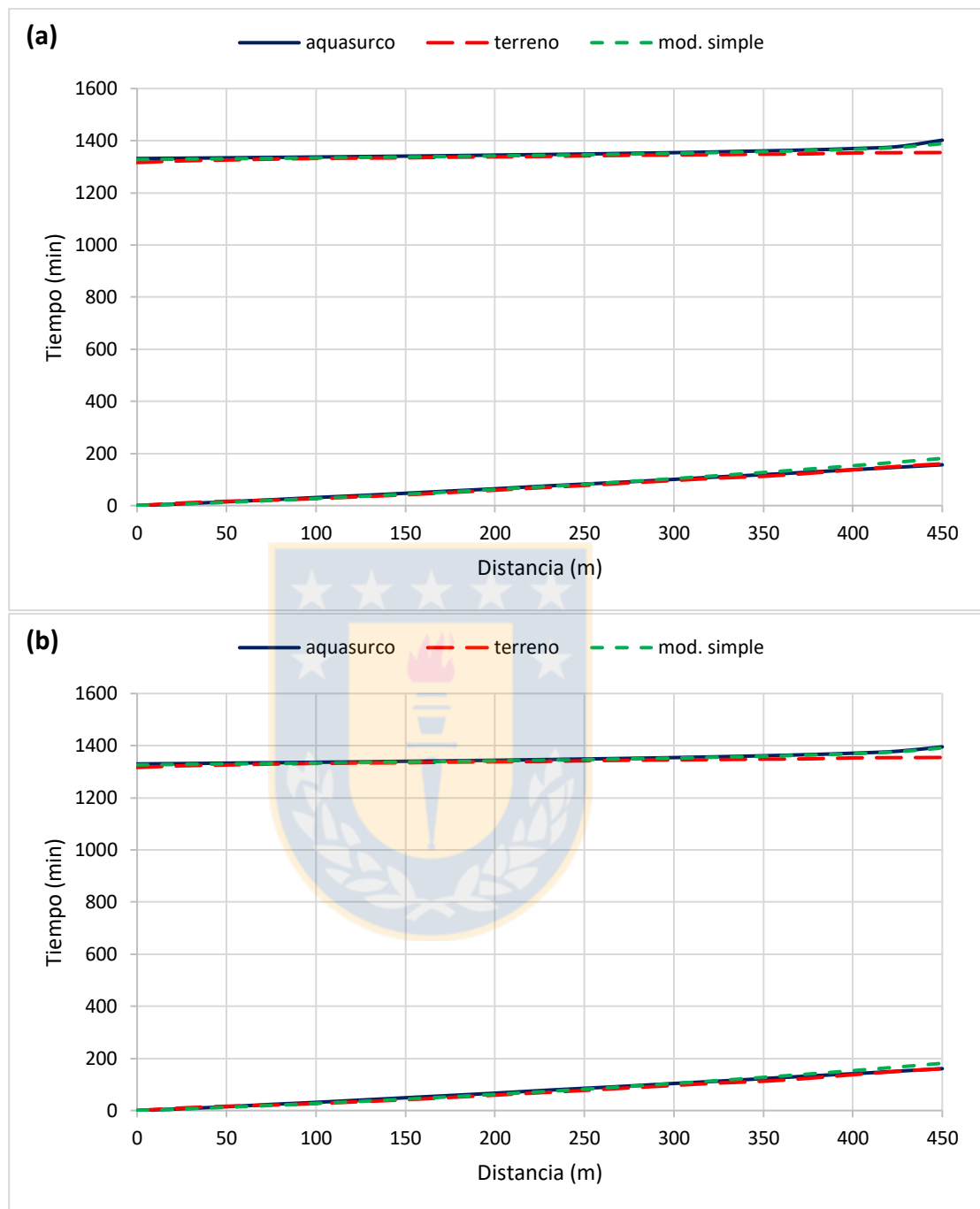
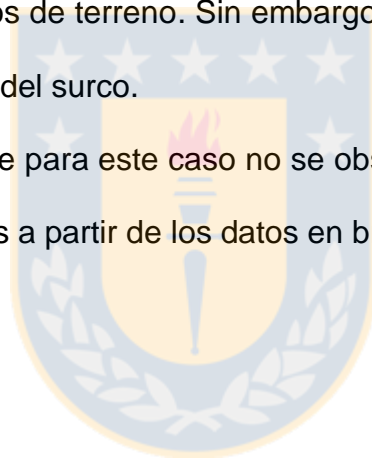


Figura 19. Curvas de avance y receso para el surco 1 con F0 a partir de los datos entregados y modelos utilizados. (a) datos en bruto y (b) datos ajustados. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 20 la curva de avance obtenida por el modelo simple, tiene una mejor estimación a los datos de terreno que el modelo cinemático Aquasurco, ya que en este último se observan mayores diferencias en la curva de avance respecto a los datos de terreno, pero de igual manera tiende a ser una buena representación. En cambio, la Figura 21 presentó un mejor ajuste a los datos de terreno en la curva de avance obtenida del modelo Aquasurco, producto de la variación al utilizar las Ecuaciones 1 y 2. En cuanto a las curvas de receso obtenidas a partir de los modelos, tanto en la Figura 20 y 21 se encuentran alejadas de los datos de terreno. Sin embargo, tienden a acercarse a medida que se llega al final del surco.

Cabe mencionar que para este caso no se observa una clara diferencia entre las curvas obtenidas a partir de los datos en bruto y los datos ajustados.



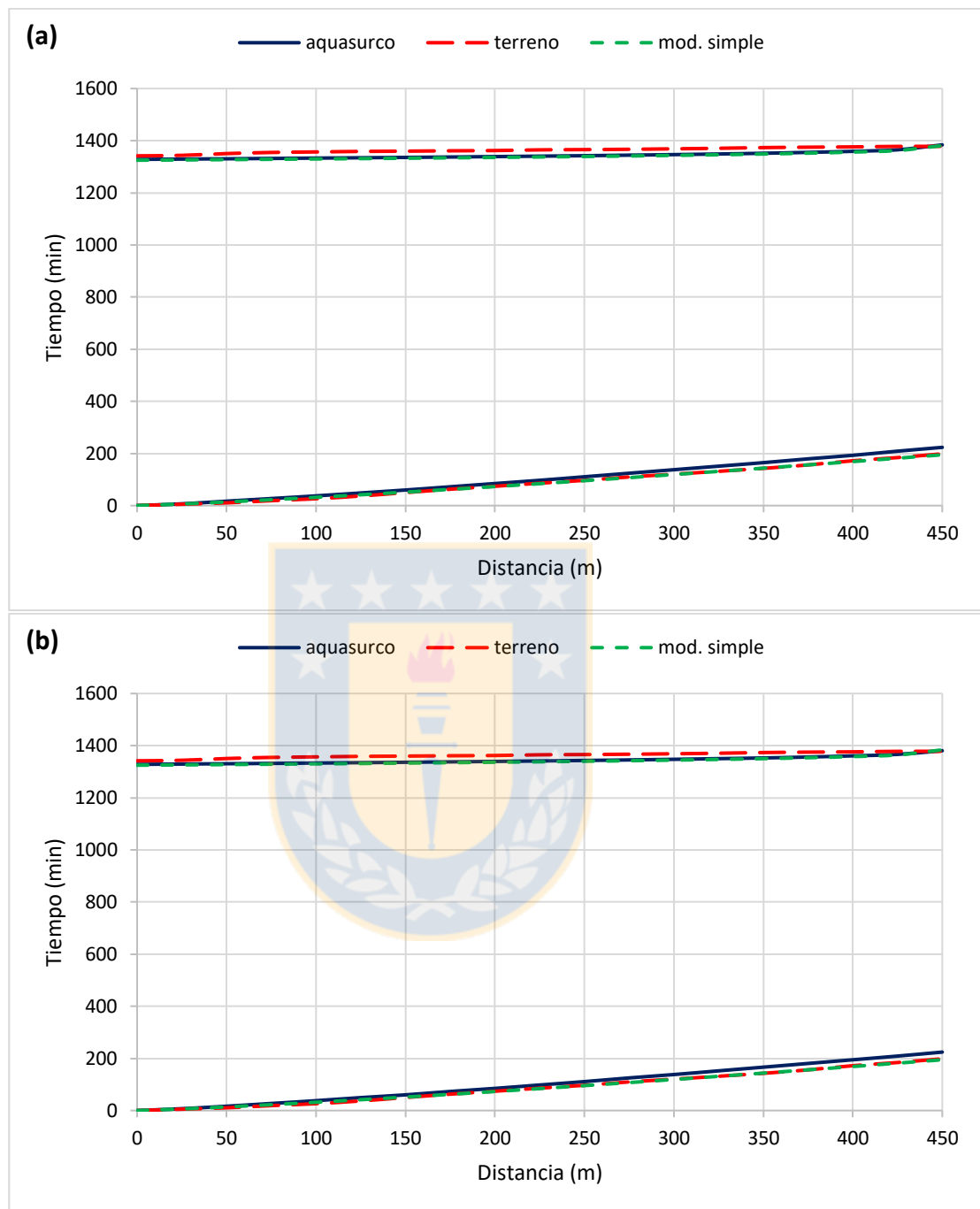


Figura 20. Curvas de avance y receso para el surco 3 sin F0 a partir de los datos entregados y modelos utilizados. (a) datos en bruto y (b) datos ajustados. Fuente: Elaboración propia.

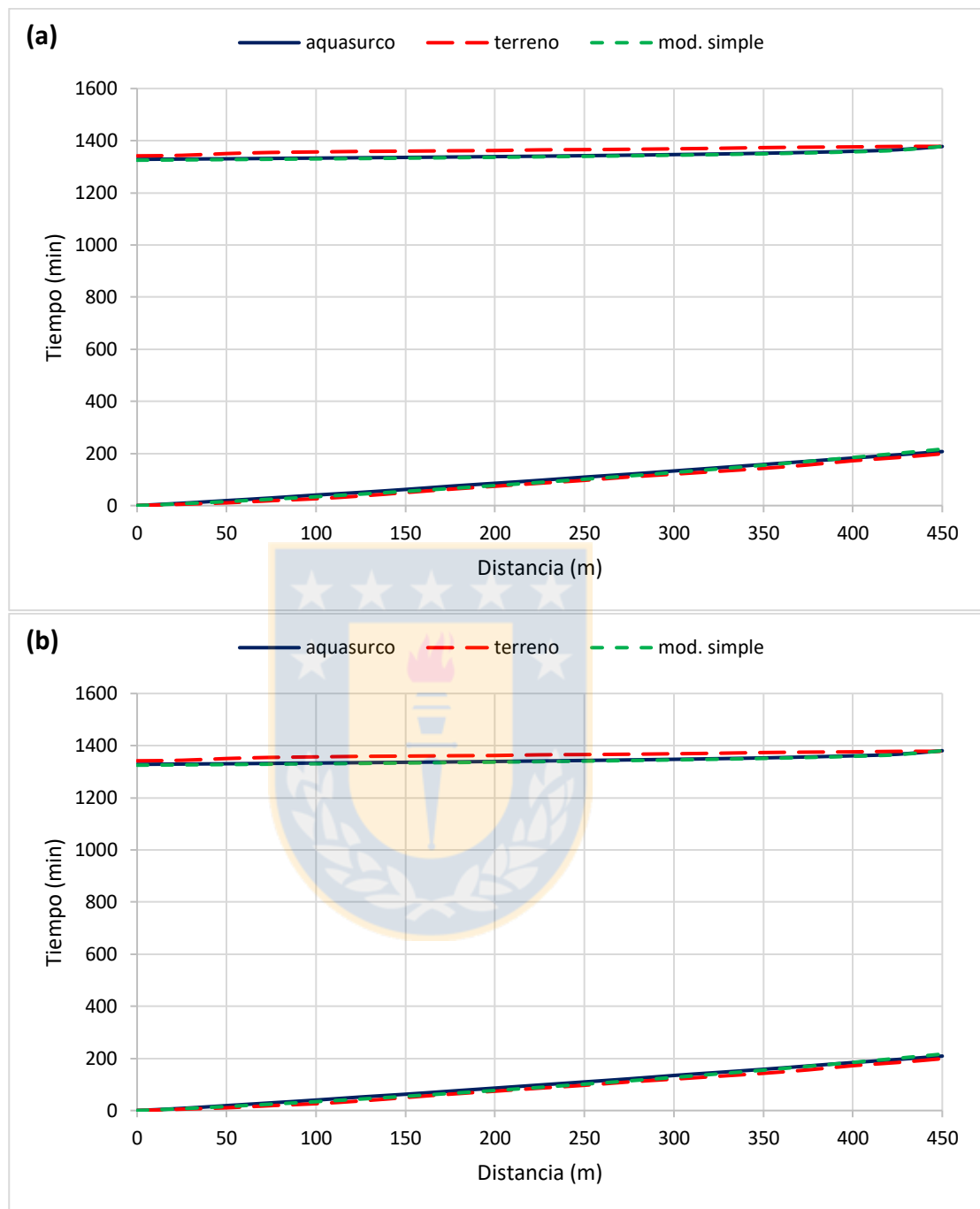
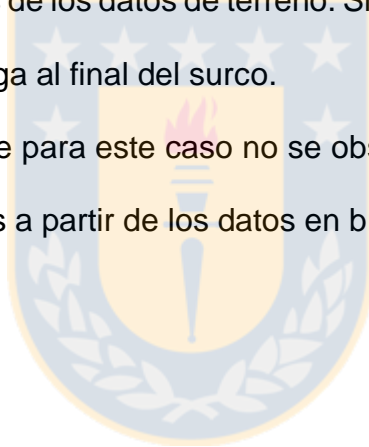


Figura 21. Curvas de avance y receso para el surco 3 con F0 a partir de los datos entregados y modelos utilizados. (a) datos en bruto y (b) datos ajustados. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 22 la curva de avance obtenida por el modelo simple, tiene una mejor estimación a los datos de terreno que el modelo cinemático Aquasurco, ya que en este último se observan mayores diferencias en la curva de avance respecto a los datos de terreno, pero de igual manera tiende a ser una buena representación. En cambio, la Figura 23 presentó que la curva de avance obtenida del modelo simple se aleja levemente de los datos de terreno, producto de la variación al utilizar las Ecuaciones 1 y 2. En cuanto a las curvas de receso obtenidas a partir de los modelos, tanto en la Figura 22 y 23 se encuentran alejadas de los datos de terreno. Sin embargo, tienden a acercarse a medida que se llega al final del surco.

Cabe mencionar que para este caso no se observa una clara diferencia entre las curvas obtenidas a partir de los datos en bruto y los datos ajustados.



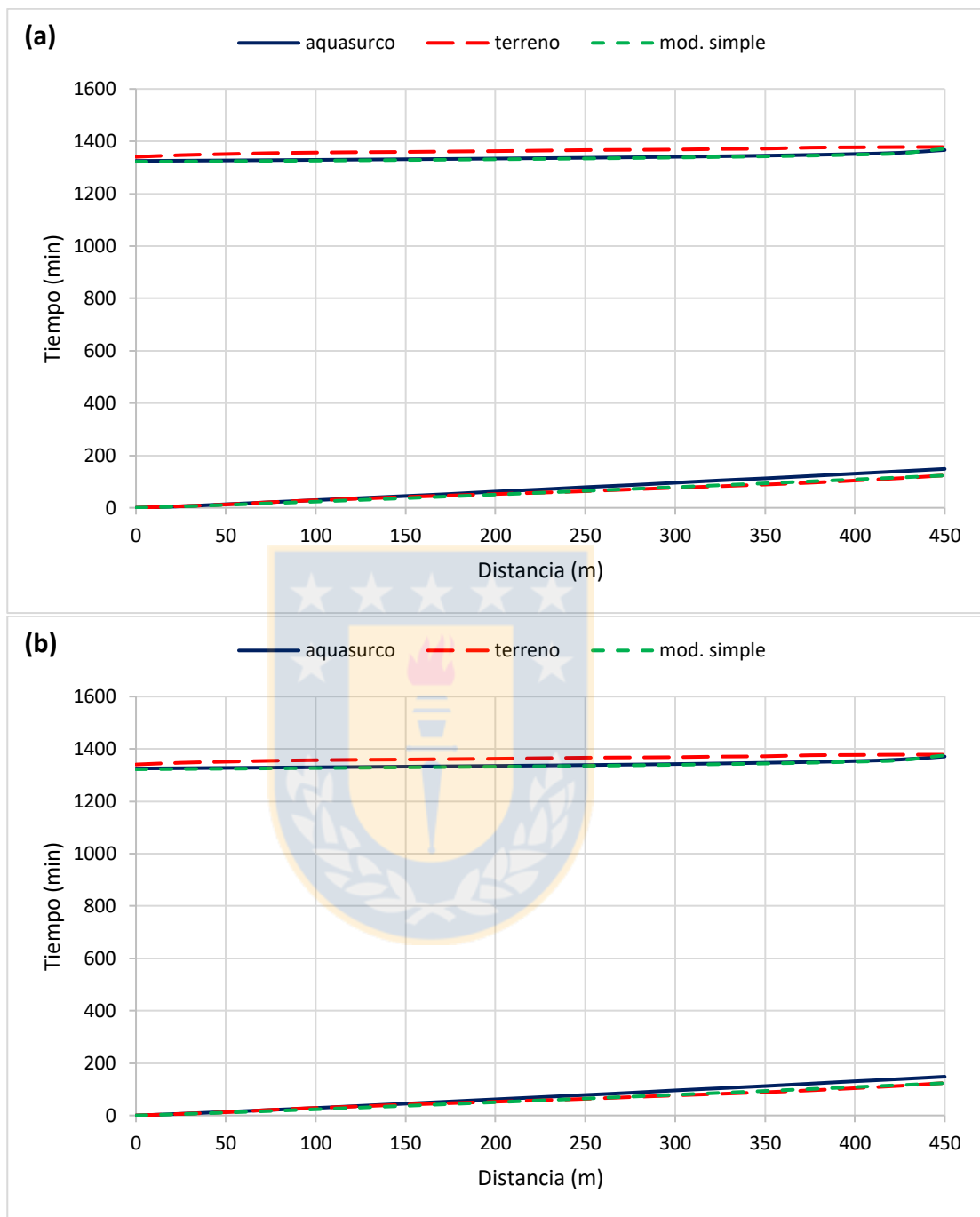


Figura 22. Curvas de avance y receso para el surco 5 sin F0 a partir de los datos entregados y modelos utilizados. (a) datos en bruto y (b) datos ajustados. Fuente: Elaboración propia.

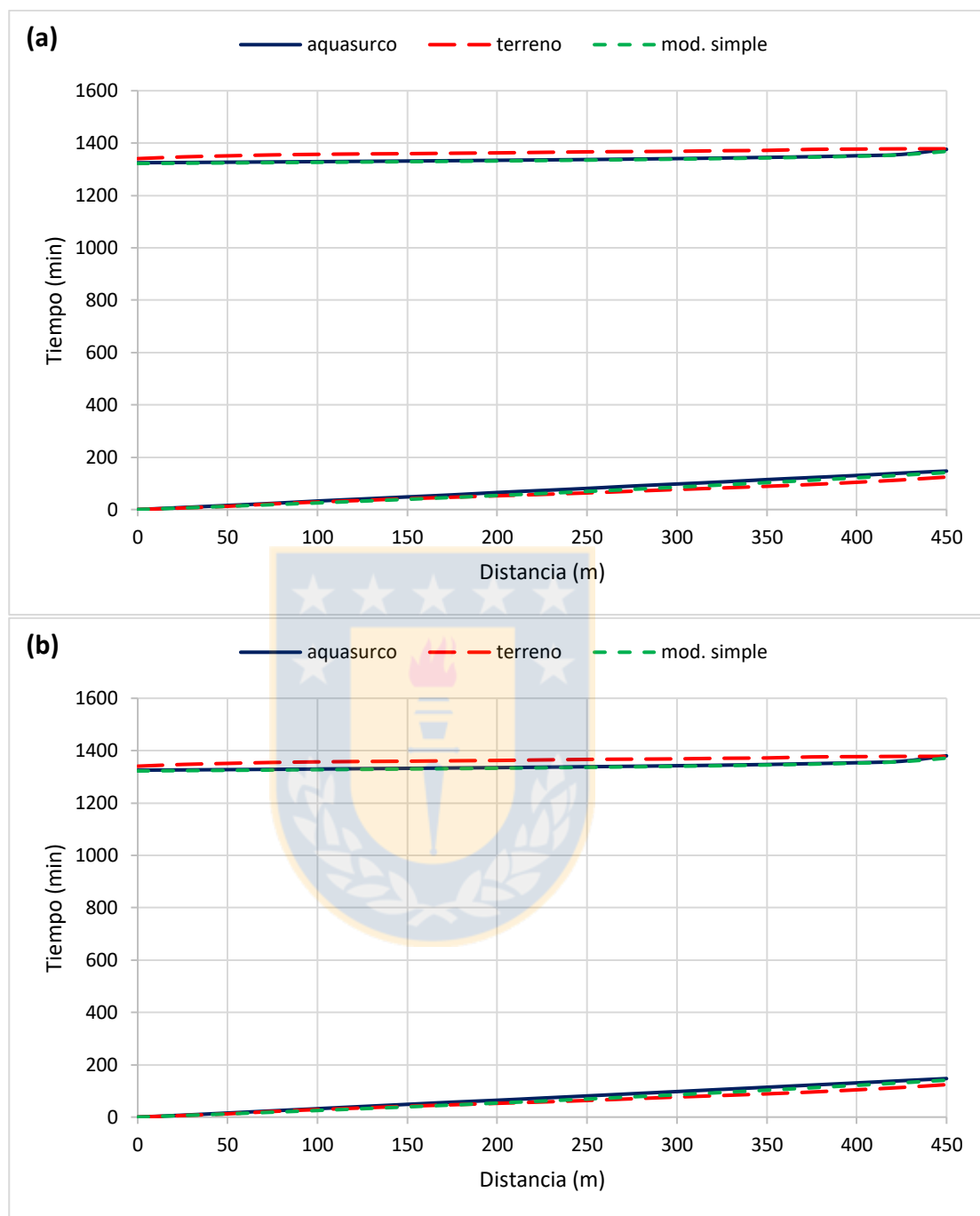


Figura 23. Curvas de avance y receso para el surco 5 con F0 a partir de los datos entregados y modelos utilizados. (a) datos en bruto y (b) datos ajustados. Fuente: Elaboración propia.

Las siguientes Tablas muestran el análisis estadístico realizado tanto para las fases de avance y receso presentado en esta localidad.

Tabla 2. Análisis estadístico para la fase de avance con datos en bruto en la localidad de Machette.

Modelos	Surco	χ^2	RMSE (min)	MAE (min)	NSE
Aguasurco	1s	3,515	8,042	6,595	0,972
	1c	2,349	4,367	3,965	0,992
	3s	2,646	15,434	13,679	0,939
	3c	7,799	11,348	10,773	0,967
	5s	2,367	16,057	12,398	0,798
	5c	0,961	16,971	14,102	0,775
Simple	1s	3,154	2,656	2,173	0,997
	1c	3,324	9,466	7,019	0,961
	3s	1,837	2,594	2,073	0,998
	3c	2,206	8,714	7,179	0,980
	5s	2,473	3,300	2,804	0,991
	5c	3,654	9,455	6,975	0,930

Donde "s" representa el análisis sin F_0 y "c" el análisis con F_0 .

Tabla 3. Análisis estadístico para la fase de avance con datos ajustados en la localidad de Machette.

Modelos	Surco	χ^2	RMSE (min)	MAE (min)	NSE
Aguasurco	1s	3,105	11,016	9,262	0,948
	1c	2,710	6,291	5,473	0,983
	3s	2,705	16,192	14,356	0,933
	3c	7,370	12,073	11,437	0,962
	5s	2,318	15,819	12,239	0,804
	5c	0,869	16,981	14,111	0,774
Simple	1s	3,203	2,668	2,183	0,997
	1c	3,351	9,539	7,070	0,961
	3s	1,833	2,592	2,072	0,998
	3c	2,205	8,720	7,183	0,980
	5s	2,472	3,300	2,803	0,991
	5c	3,654	9,454	6,975	0,930

Donde "s" representa el análisis sin F_0 y "c" el análisis con F_0 .

Tabla 4. Análisis estadístico para la fase de receso con datos en bruto en la localidad de Machette.

Modelos	Surco	χ^2	RMSE (min)	MAE (min)	NSE
Aguasurco	1s	0,394	13,783	11,503	-0,683
	1c	0,613	15,369	12,087	-1,093
	3s	0,340	20,651	20,047	-2,837
	3c	0,243	20,593	19,747	-2,816
	5s	0,159	26,018	25,583	-5,270
	5c	0,288	25,809	25,012	-5,170
Simple	1s	0,552	12,170	8,228	-0,312
	1c	0,406	11,394	8,413	-0,150
	3s	0,351	23,617	22,851	-4,018
	3c	0,294	23,159	22,255	-3,826
	5s	0,266	28,584	27,923	-6,568
	5c	0,205	28,149	27,636	-6,339

Donde "s" representa el análisis sin F_0 y "c" el análisis con F_0 .

Tabla 5. Análisis estadístico para la fase de receso con datos ajustados en la localidad de Machette.

Modelos	Surco	χ^2	RMSE (min)	MAE (min)	NSE
Aguasurco	1s	0,507	14,217	11,305	-0,791
	1c	0,515	14,263	11,312	-0,803
	3s	0,279	20,121	19,359	-2,643
	3c	0,282	20,082	19,307	-2,629
	5s	0,194	24,702	24,146	-4,652
	5c	0,339	24,604	23,824	-4,607
Simple	1s	0,688	13,096	8,437	-0,520
	1c	0,502	12,187	8,680	-0,316
	3s	0,404	23,094	22,422	-3,798
	3c	0,336	22,579	21,755	-3,587
	5s	0,311	27,410	26,605	-5,959
	5c	0,233	26,946	26,338	-5,725

Donde "s" representa el análisis sin F_0 y "c" el análisis con F_0 .

Según los resultados de los análisis de la Tabla 2 y 3, se pudo apreciar una buena correlación y aceptación del modelo cinemático Aguasurco, pero

también se observó que en algunos casos el modelo de avance simple tiende a presentar un mejor ajuste, asemejándose más a los datos de terreno en la fase de avance. En cuanto a los análisis realizados para la fase de receso en las Tablas 4 y 5, se observó que el modelo Aquasurco en la gran mayoría de los casos analizados presenta una mejor correlación y semejanza a los datos de terreno en esta localidad, aun cuando el coeficiente de Nash-Sutcliffe indica que la media de los datos de terreno son una mejor predicción que los modelos ($NSE < 0$).

Otro punto clave que se pudo apreciar es referente al ajuste de la geometría del surco para la obtención de los factores de forma e hidráulicos, ya que la variación de estos factores no produjo un cambio abrupto en las áreas de los surcos, pudiéndose decir que en este caso específico no era necesaria un ajuste de los datos.

También queda en evidencia leves variaciones que se producen en las fases de avance y receso al utilizar la Ecuación 1 y la Ecuación 2, debido al factor F_0 .

5.2 Localidad 2: Machette

Los antecedentes utilizados para el análisis en esta localidad consideran un suelo de tipo franco a franco arcillosa, el cual ya presenta 5 sucesos de riego, con una pendiente de $0,0101 \text{ m m}^{-1}$ y un largo de surco de 400 m.

5.2.1 Forma del surco

Se observa en la Figura 24, que la geometría de los surcos se presenta con una forma parabólica en todos ellos. También son visibles pequeñas imperfecciones del terreno al momento de medir la geometría, las cuales pueden generar alteraciones.

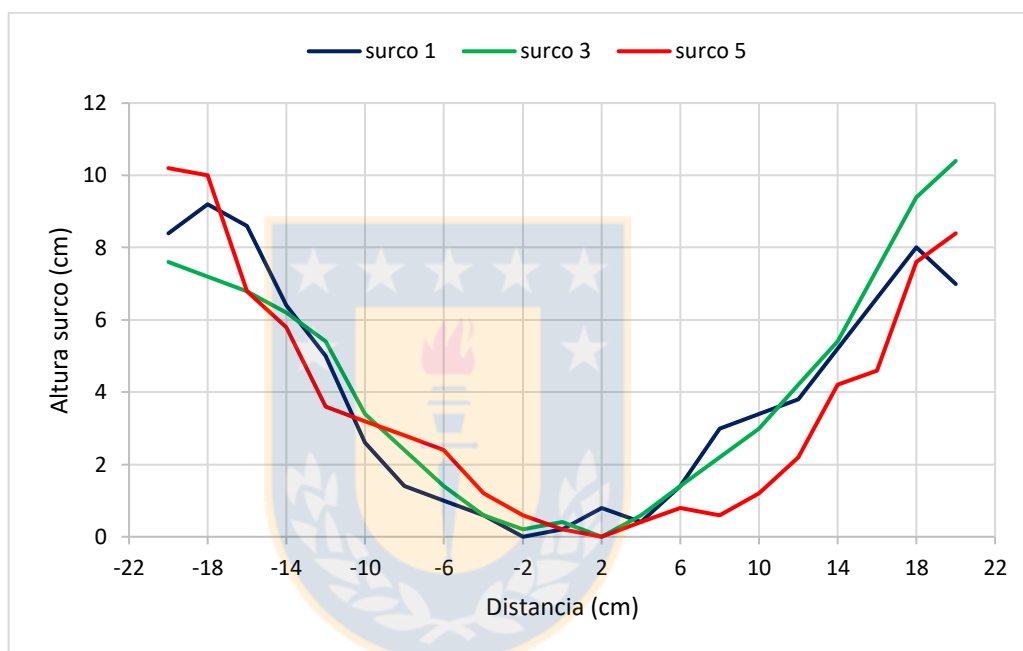


Figura 24. Geometría de surco observada en la localidad de Machette con fecha 25 de julio de 1979. Fuente: Elaboración propia.

Siguiendo la metodología para la determinación de los factores de forma del surco, se obtuvo la representación de tipo potencial para cada surco, tal como lo menciona Brown-Manrique *et al.* (2019), Karmeli (1978), Mostafazadefard (1982). En las Figuras 25, 26, 27 se muestra esta representación de tipo potencial.

En la Figura 25(a) se puede observar una deficiente correlación (R^2) entre los datos de terreno y la ecuación de tipo potencial, siendo la representación un tanto achatada. Por el contrario, al realizar un ajuste de los datos la Figura 25(b) muestra una alta correlación con R^2 de 0,96 tendiendo a ser una semi-parábola, tal como se puede observar en terreno.

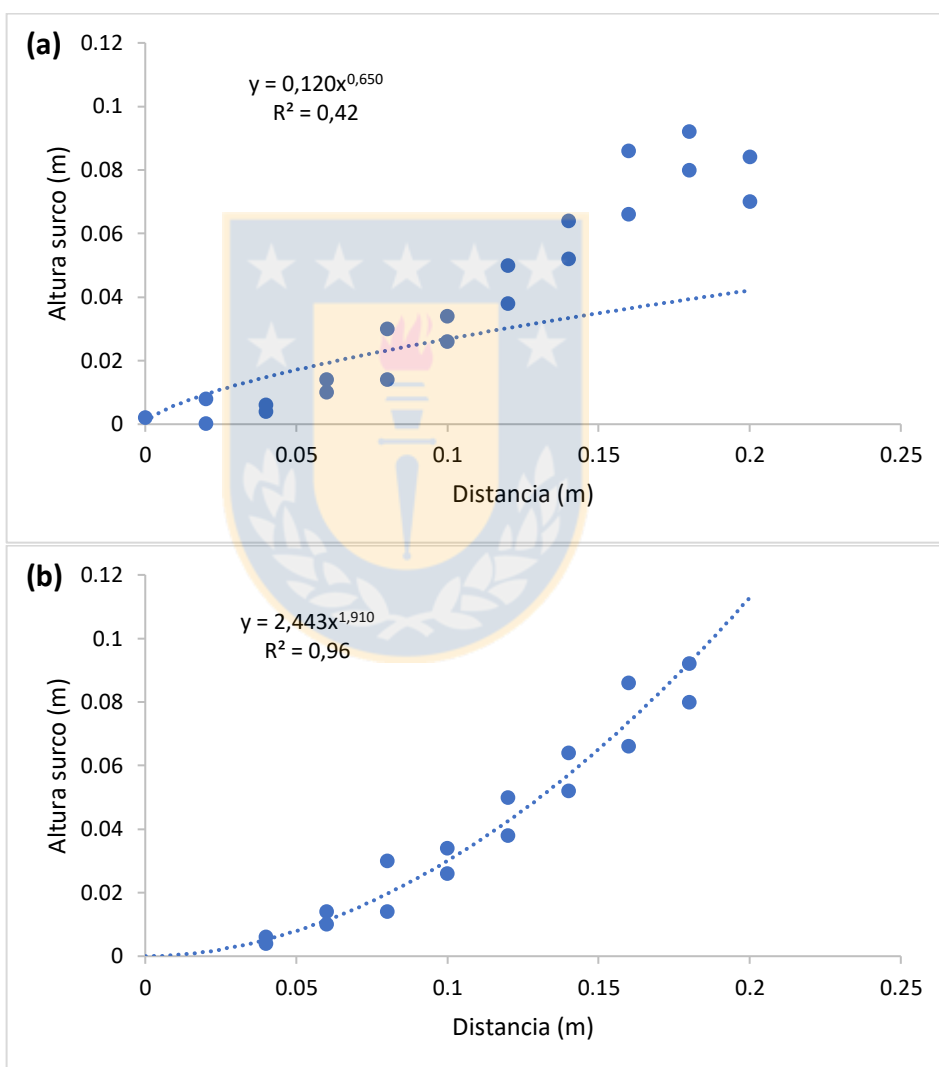


Figura 25. Forma del surco 1 considerando los antecedentes de ambos lados desde el centro. (a) datos en bruto y (b) datos ajustados. Fuente: Elaboración propia.

Las Figuras 26(a) y 26(b) siguen el mismo comportamiento que en la Figura 25(a) y 25(b) respectivamente, donde se puede observar un bajo grado de correlación en el primer caso y en el segundo al realizar el ajuste de los datos, se da origen a la semi-parábola la cual corresponde a la forma que mejor representa al surco.

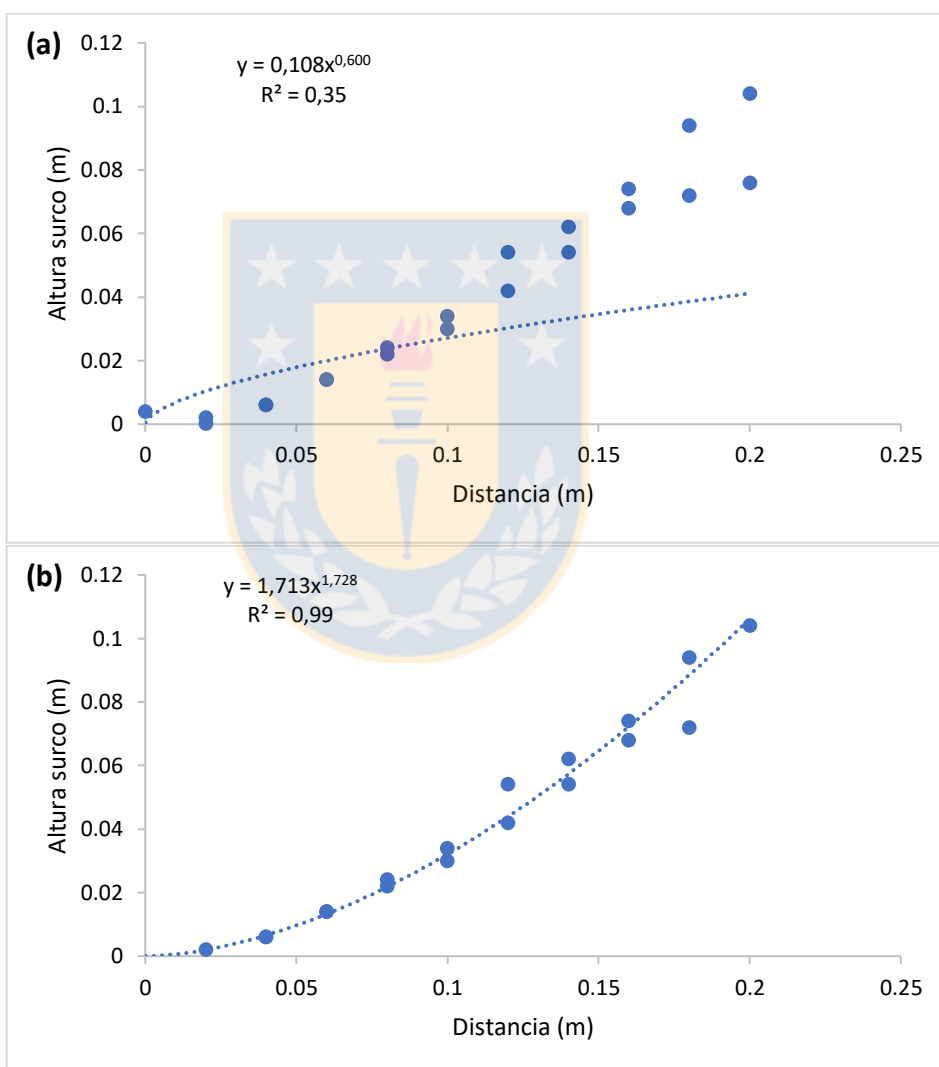


Figura 26. Forma del surco 3 considerando los antecedentes de ambos lados desde el centro. (a) datos en bruto y (b) datos ajustados. Fuente: Elaboración propia.

Tal como se presentó en las Figuras 25 y 26, la Figura 27 sigue el mismo comportamiento que las dos mencionadas anteriormente. Teniendo una baja correlación con los datos en bruto y una alta correlación incluyendo la forma semi-parabólica con los datos ajustados.

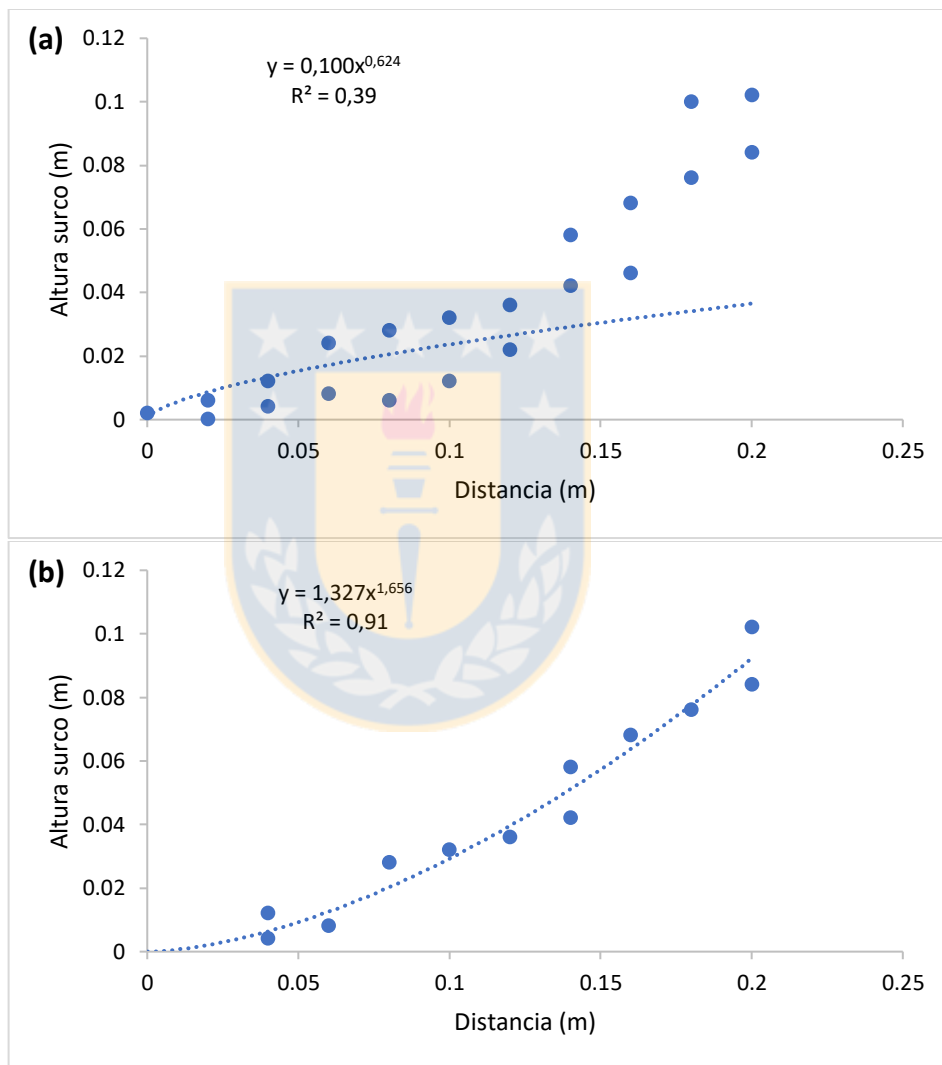


Figura 27. Forma del surco 5 considerando los antecedentes de ambos lados desde el centro. (a) datos en bruto y (b) datos ajustados. Fuente: Elaboración propia.

Utilizando desde la ecuación 10 hasta la ecuación 27, se obtuvieron los factores de forma e hidráulicos del surco, así como también el área de éstos. En la Tabla 6 se entrega un resumen de estos factores para cada caso específico en esta localidad.

Tabla 6. Factores de forma e hidráulicos del surco para caso en bruto y ajustado con su respectiva área en la localidad de Machette.

Surco	Caso	E_1	E_2	F_1	F_2	Área (m ²)
1	b	20,5762	2,5380	0,0603	2,5312	0,00356
	a	0,8226	1,5235	0,6346	2,8666	0,00303
3	b	30,7053	2,6678	0,0504	2,5075	0,00445
	a	0,9277	1,5788	0,5447	2,8366	0,00360
5	b	30,9989	2,6026	0,0489	2,5168	0,00418
	a	1,0513	1,6038	0,4849	2,8248	0,00337

Como se puede observar en la Tabla 6 los factores presentan grandes variaciones entre los datos brutos y ajustados, siendo el que menos sufre cambios el factor hidráulico F_2 , este suceso se ve reflejado al momento de obtener el área, ya que esta presenta una disminución de 0,00053 m² en el surco 1, de 0,00085 m² en el surco 3 y de 0,00083 m² en el surco 5 al momento de ajustar los datos de geometría.

5.2.2 Fases de riego (avance y receso)

En la Figura 28 y 29 las curvas de avance obtenidas por el modelo Aquasurco y el modelo de avance simple, representan de buena forma lo indicado por los datos de terreno, pero se logran ver algunas diferencias en los últimos 50 metros en las fases de avance obtenidas del modelo Aquasurco, producido por la variación entre las Ecuaciones de infiltración 1 y 2. En cuanto a la curva de receso, se logra distinguir una gran representación de los modelos a lo largo del surco, asemejándose a los datos de terreno.

Cabe mencionar que para este caso no se aprecia una clara diferenciación entre las curvas obtenidas a partir de los datos en bruto y los datos ajustados.



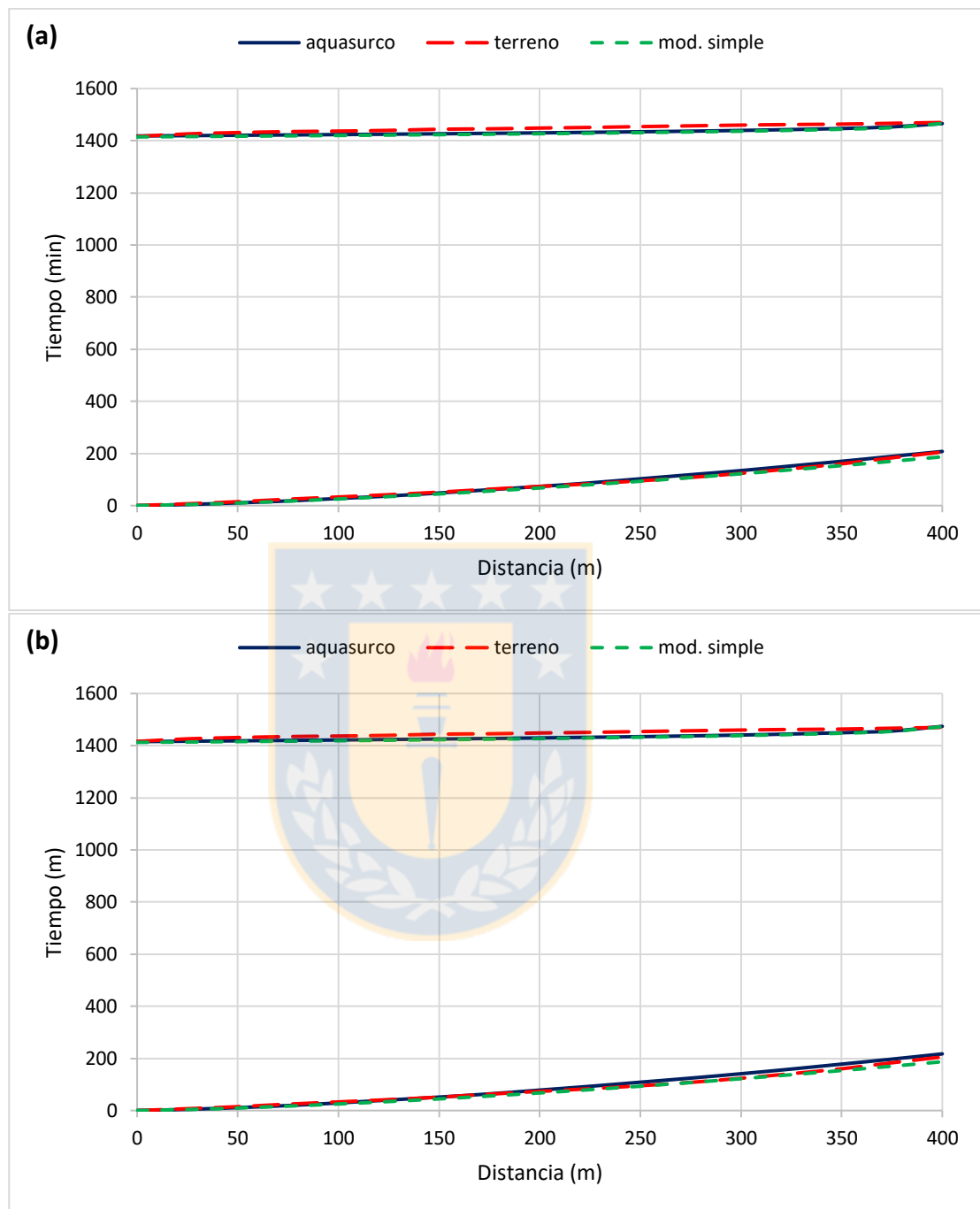


Figura 28. Curvas de avance y receso para el surco 1 sin F0 a partir de los datos entregados y modelos utilizados. (a) datos en bruto y (b) datos ajustados. Fuente: Elaboración propia.

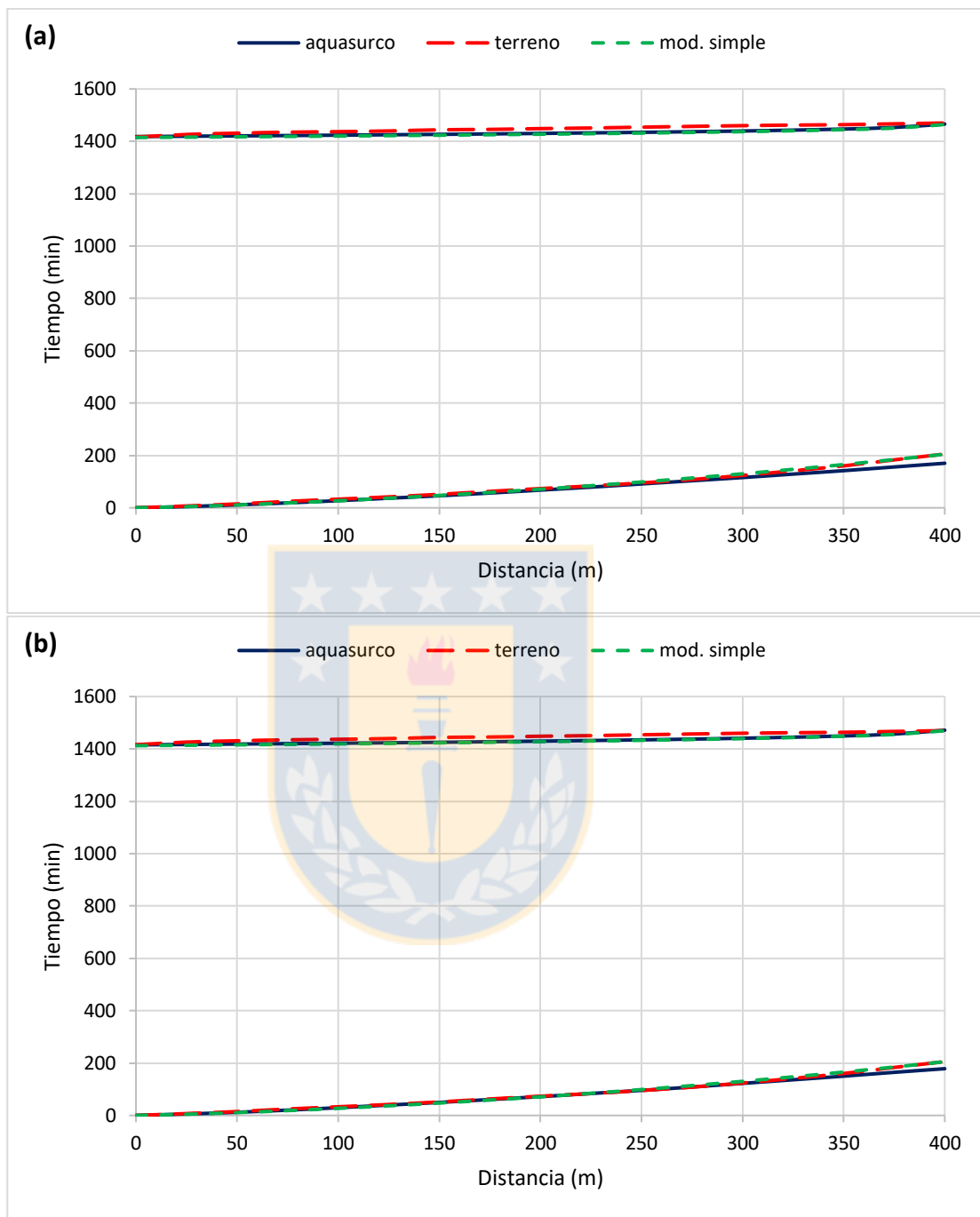
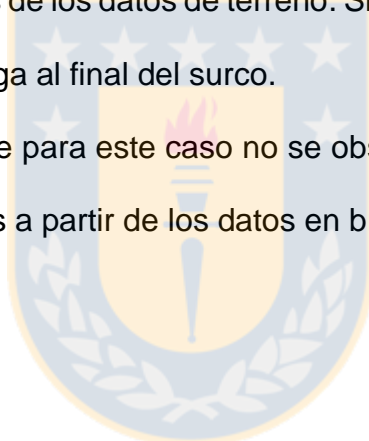


Figura 29. Curvas de avance y receso para el surco 1 con F0 a partir de los datos entregados y modelos utilizados. (a) datos en bruto y (b) datos ajustados. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 30 la curva de avance obtenida por los modelos tiende a seguir el mismo comportamiento que la curva obtenida a partir de los datos de terreno, siendo una muy buena estimación. En cambio, la curva de avance obtenida por el modelo Aquasurco en la Figura 31, tiende a alejarse de los datos de terreno a partir de los 300 metros, esto es producido por las variaciones entre las Ecuaciones de infiltración 1 y 2, donde influye el F_0 . Por lo tanto, en este caso tiene mejor aceptación el modelo de avance simple. En cuanto a las curvas de receso a partir de los modelos, tanto en la Figura 30 y 31 se encuentran alejadas de los datos de terreno. Sin embargo, tienden a acercarse a medida que se llega al final del surco.

Cabe mencionar que para este caso no se observa una clara diferencia entre las curvas obtenidas a partir de los datos en bruto y los datos ajustados.



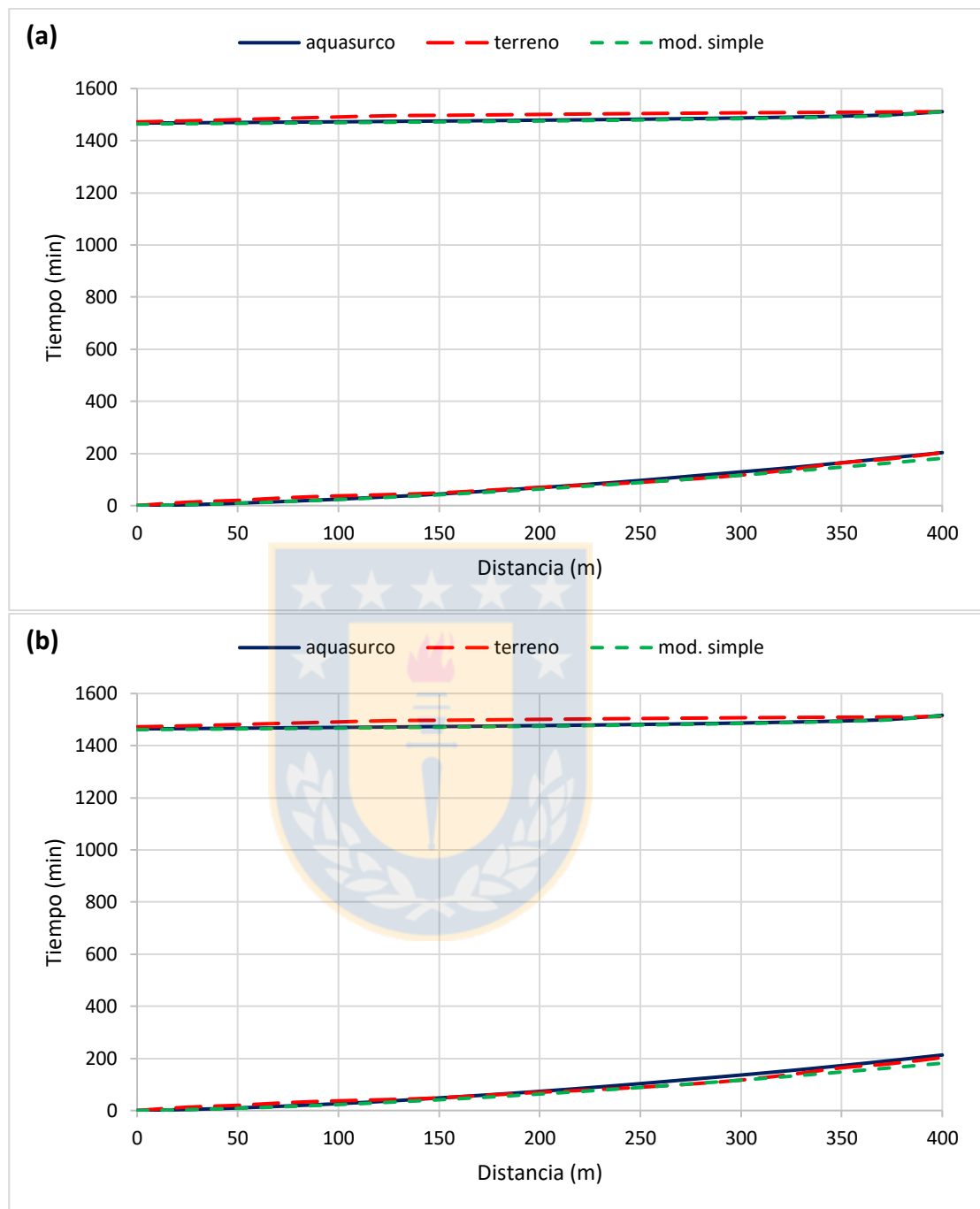


Figura 30. Curvas de avance y receso para el surco 3 sin F0 a partir de los datos entregados y modelos utilizados. (a) datos en bruto y (b) datos ajustados. Fuente: Elaboración propia.

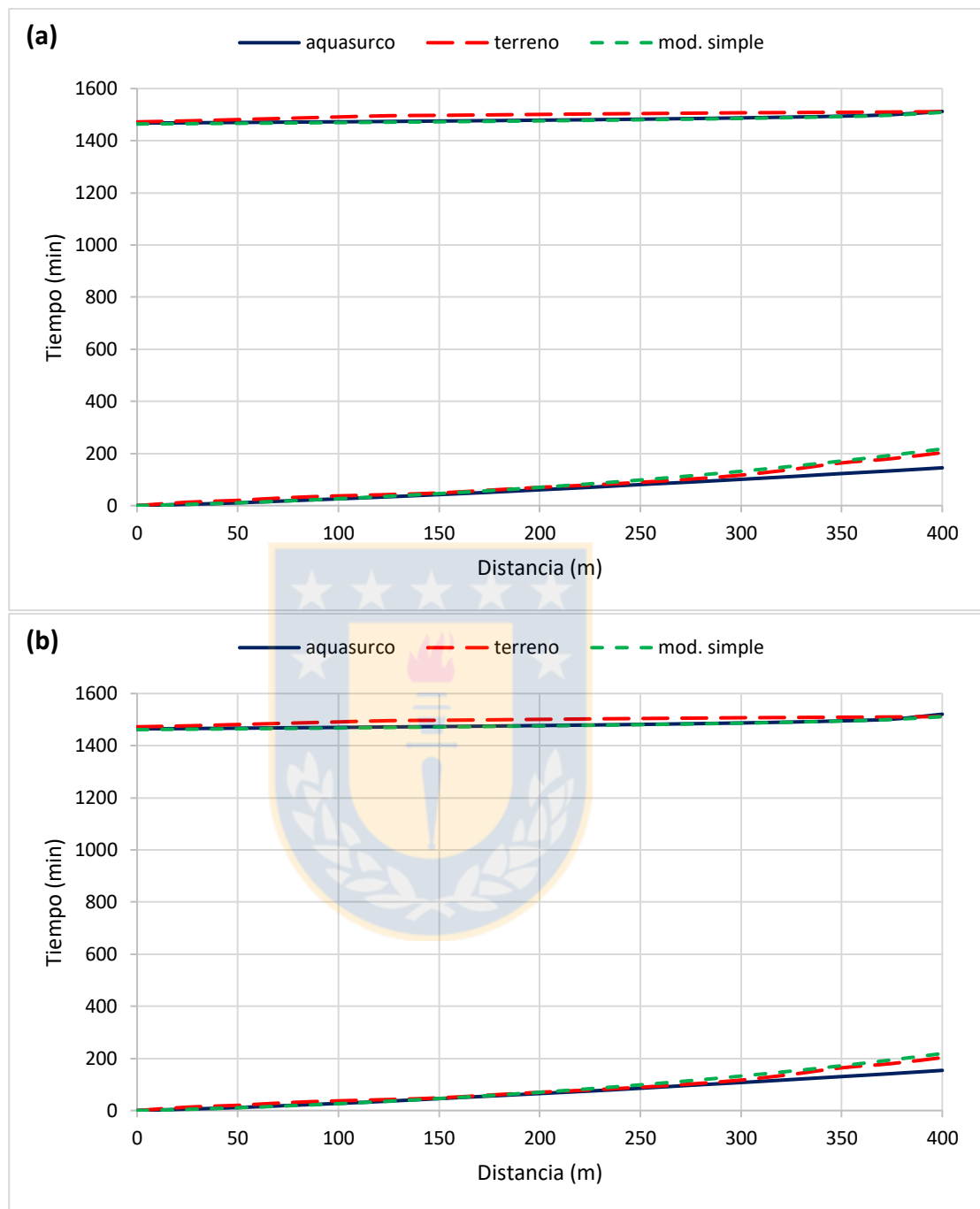
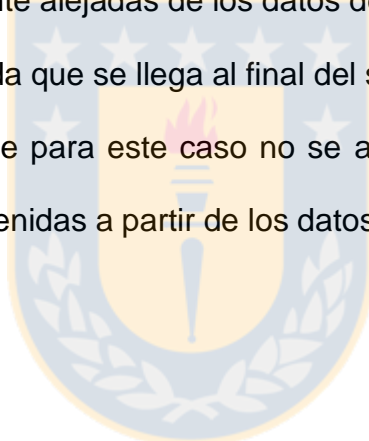


Figura 31. Curvas de avance y receso para el surco 3 con F0 a partir de los datos entregados y modelos utilizados. (a) datos en bruto y (b) datos ajustados. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 32 la curva de avance obtenida por los modelos tiende a seguir el mismo comportamiento que la curva obtenida a partir de los datos de terreno, siendo una muy buena estimación. En cambio, la curva de avance obtenida por el modelo de avance simple en la Figura 33, tiende a alejarse de los datos de terreno a partir de los 300 metros, esto es producido por las variaciones entre las Ecuaciones de infiltración 1 y 2, donde influye el F_0 . Por lo tanto, en este caso tiene mejor aceptación el modelo cinemático Aquasurco. En cuanto a las curvas de receso a partir de los modelos, tanto en la Figura 32 y 33 se encuentran levemente alejadas de los datos de terreno. Sin embargo, tienden a acercarse a medida que se llega al final del surco.

Cabe mencionar que para este caso no se aprecia una clara diferenciación entre las curvas obtenidas a partir de los datos en bruto y los datos ajustados.



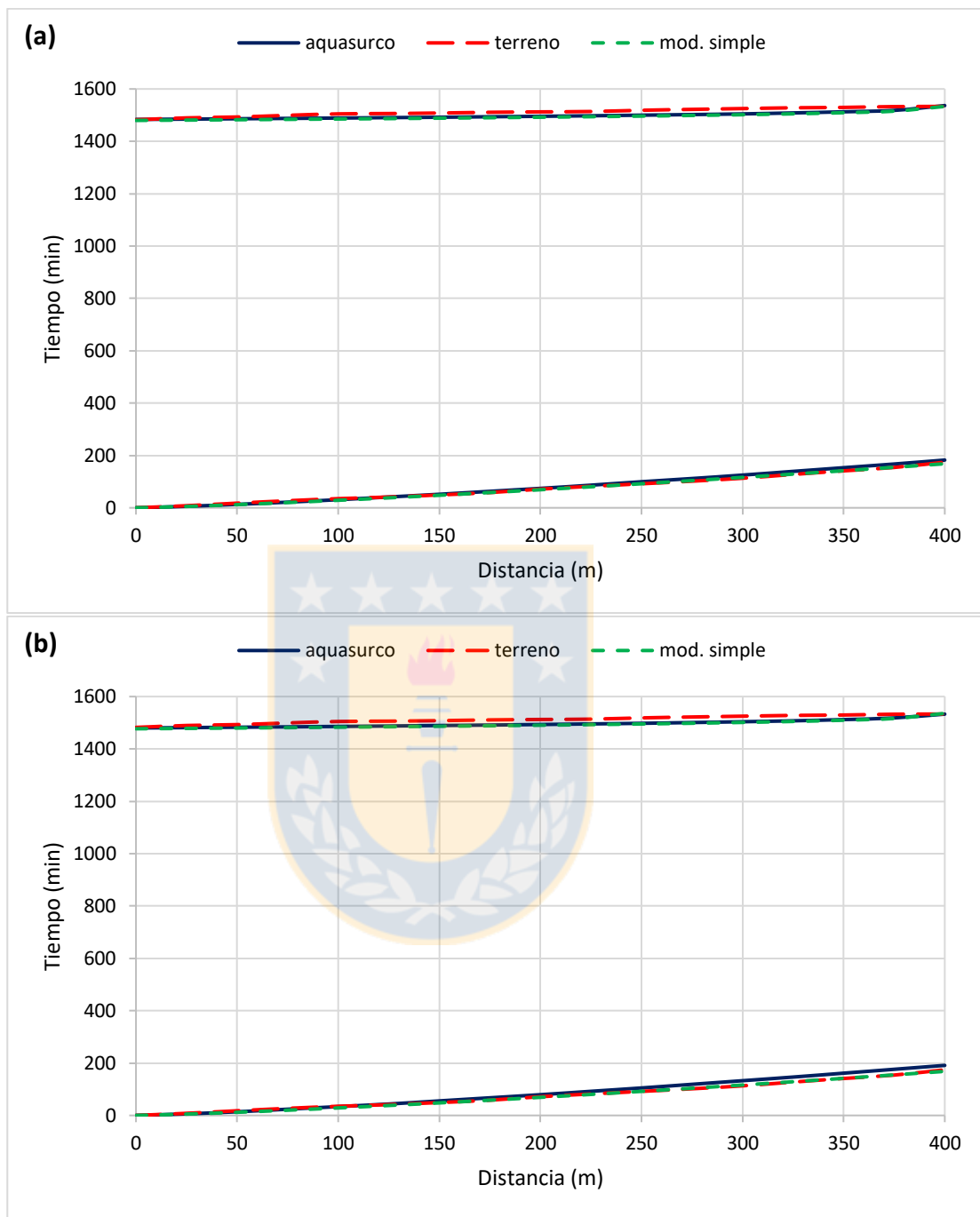


Figura 32. Curvas de avance y receso para el surco 5 sin F0 a partir de los datos entregados y modelos utilizados. (a) datos en bruto y (b) datos ajustados. Fuente: Elaboración propia.

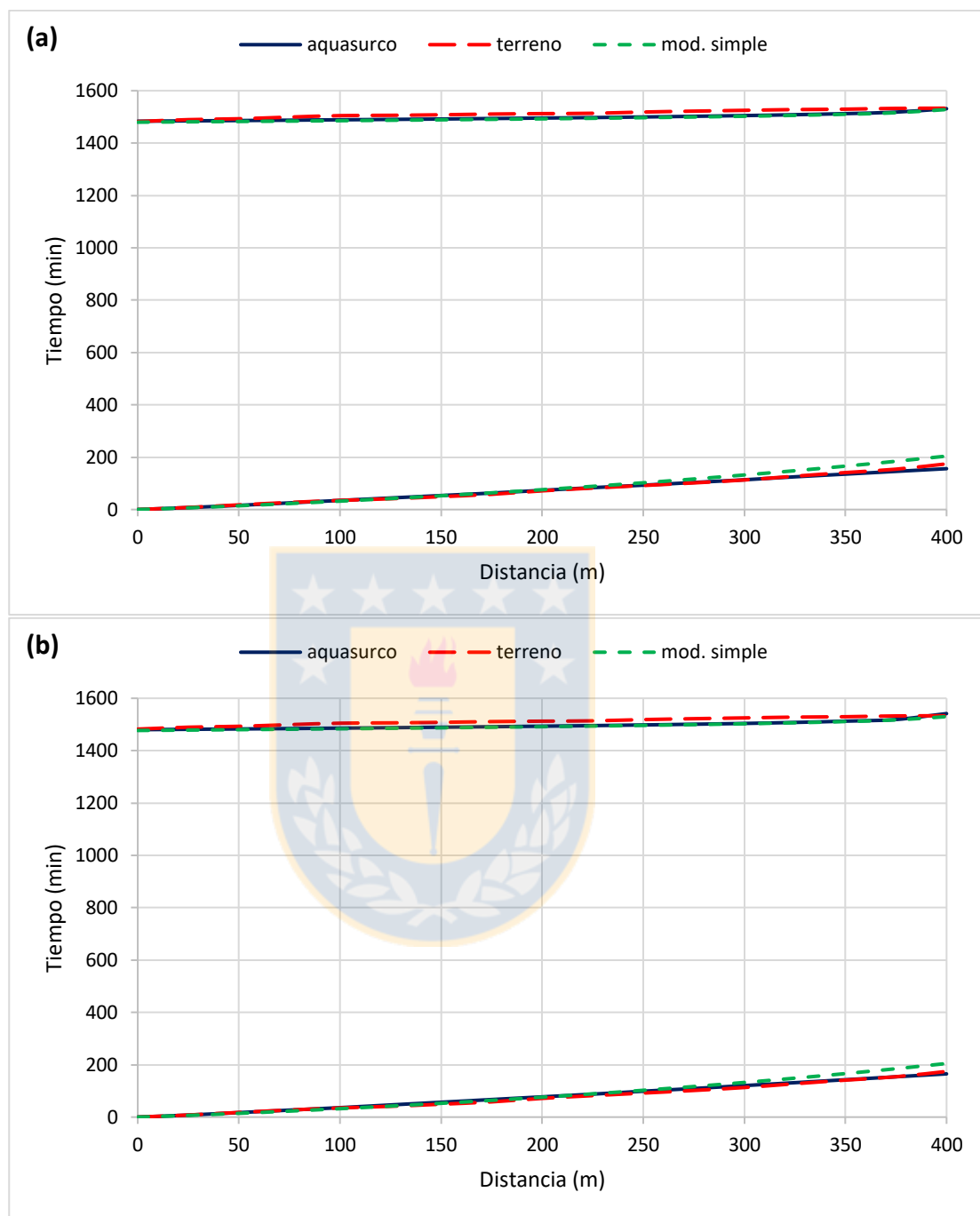


Figura 33. Curvas de avance y receso para el surco 5 con F0 a partir de los datos entregados y modelos utilizados. (a) datos en bruto y (b) datos ajustados. Fuente: Elaboración propia.

Las siguientes Tablas muestran el análisis estadístico realizado tanto para las fases de avance y receso presentado en esta localidad.

Tabla 7. Análisis estadístico para la fase de avance con datos en bruto en la localidad de Machette.

Modelos	Surco	χ^2	RMSE (min)	MAE (min)	NSE
Aguasurco	1s	5,221	6,321	5,308	0,989
	1c	2,249	12,884	9,112	0,955
	3s	19,698	7,943	6,412	0,982
	3c	8,805	23,312	17,175	0,844
	5s	3,476	7,473	6,211	0,979
	5c	1,967	5,537	3,449	0,988
Simple	1s	3,971	7,401	5,909	0,985
	1c	3,713	4,183	3,683	0,995
	3s	15,605	10,688	8,623	0,967
	3c	15,835	9,486	8,187	0,974
	5s	3,388	3,455	2,595	0,996
	5c	4,219	14,709	10,747	0,919

Donde "s" representa el análisis sin F_0 y "c" el análisis con F_0 .

Tabla 8. Análisis estadístico para la fase de avance con datos ajustados en la localidad de Machette.

modelos	surco	χ^2	RMSE (min)	MAE (min)	NSE
Aguasurco	1s	4,768	10,538	8,268	0,970
	1c	2,162	8,629	4,932	0,980
	3s	18,916	10,935	9,385	0,966
	3c	9,422	18,792	12,841	0,899
	5s	3,273	12,595	10,215	0,940
	5c	2,045	5,424	4,284	0,989
Simple	1s	4,291	7,436	5,959	0,985
	1c	3,941	4,326	3,794	0,995
	3s	16,536	10,756	8,704	0,967
	3c	16,424	9,915	8,524	0,972
	5s	3,539	3,503	2,636	0,995
	5c	4,311	14,945	10,908	0,916

Donde "s" representa el análisis sin F_0 y "c" el análisis con F_0 .

Tabla 9. Análisis estadístico para la fase de receso con datos en bruto en la localidad de Machette.

Modelos	Surco	χ^2	RMSE (min)	MAE (min)	NSE
Aguasurco	1s	0,217	15,515	14,489	-0,105
	1c	0,217	15,460	14,430	-0,098
	3s	0,257	17,307	15,951	-1,138
	3c	0,265	17,260	15,936	-1,127
	5s	0,276	15,028	13,834	-0,016
	5c	0,226	15,015	13,759	-0,015
Simple	1s	0,239	18,473	17,328	-0,567
	1c	0,210	18,158	17,141	-0,514
	3s	0,296	20,219	18,916	-1,918
	3c	0,248	19,717	18,585	-1,775
	5s	0,273	18,188	16,797	-0,489
	5c	0,207	17,709	16,629	-0,411

Donde "s" representa el análisis sin F_0 y "c" el análisis con F_0 .

Tabla 10. Análisis estadístico para la fase de receso con datos ajustados en la localidad de Machette.

Modelos	Surco	χ^2	RMSE (min)	MAE (min)	NSE
Aguasurco	1s	0,252	15,499	14,531	-0,103
	1c	0,224	15,378	14,289	-0,086
	3s	0,337	18,847	17,779	-1,536
	3c	0,405	18,817	17,882	-1,528
	5s	0,225	16,763	15,518	-0,265
	5c	0,332	16,754	15,869	-0,263
Simple	1s	0,261	17,767	16,797	-0,450
	1c	0,210	17,244	16,184	-0,366
	3s	0,355	20,938	19,826	-2,130
	3c	0,281	20,126	18,871	-1,892
	5s	0,287	19,294	18,224	-0,675
	5c	0,192	18,465	17,515	-0,534

Donde "s" representa el análisis sin F_0 y "c" el análisis con F_0 .

Según los resultados de los análisis de la Tabla 7 y 8, se aprecia una buena correlación y aceptación del modelo cinemático Aguasurco, pero también se

observó que en algunos casos el modelo de avance simple tiende a presentar un mejor ajuste, asemejándose más a los datos de terreno en la fase de avance. En cuanto a los análisis realizados para la fase de receso en las Tablas 9 y 10, se observó que el modelo Aquasurco en la gran mayoría de los casos analizados presenta una mejor correlación y semejanza a los datos de terreno en esta localidad, aun cuando el coeficiente de Nash-Sutcliffe indica que la media de los datos de terreno son una mejor predicción que los modelos ($NSE < 0$).

También se pudo apreciar que el ajuste de la geometría del surco para la obtención de los factores de forma e hidráulicos no era necesaria debido a la baja variabilidad en los análisis estadísticos realizados, aun cuando el área de flujo se ve disminuida.

También queda en evidencia leves variaciones que se producen en las fases de avance y receso al utilizar la Ecuación 1 y la Ecuación 2, debido al F_0 .

5.3 Localidad 3: Colorado

Los antecedentes utilizados para el análisis en esta localidad consideran un suelo de tipo franco arenosa, el cual ya presenta 2 sucesos de riego, con una pendiente de $0,0038 \text{ m m}^{-1}$ y un largo de surco de 175 m.

5.3.1 Forma del surco

Se observa en la Figura 34, que la geometría de los surcos se presenta con tendencia a ser una parábola, pero también se revela que el surco 3 tiene una elevación más lineal en su geometría y que el surco 1 tiende a ser achatado, en comparación a los surcos 3 y 5.

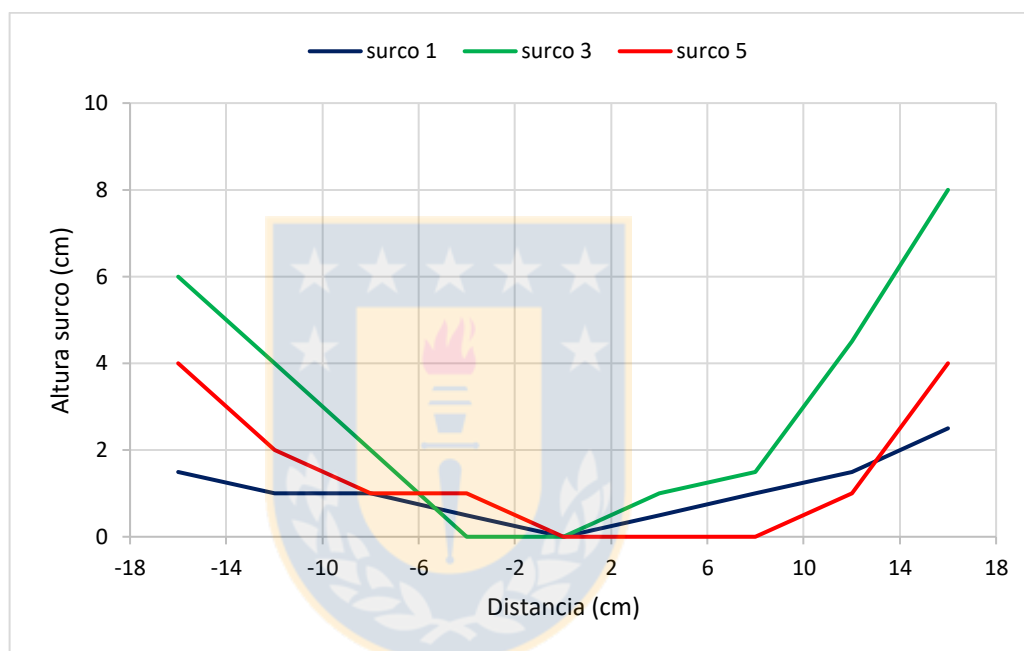


Figura 34. Geometría de surco observada en la localidad de Colorado con fecha 24 de junio de 1977. Fuente: Elaboración propia.

Siguiendo la metodología para la determinación de los factores de forma del surco, se obtuvo la representación de tipo potencial para cada surco, tal como lo menciona Brown-Manrique *et al.* (2019), Karmeli (1978), Mostafazadefard (1982). En las Figuras 35, 36, 37 se muestra esta representación de tipo potencial.

En la Figura 35(a) se observa una buena correlación (R^2) entre los datos y la ecuación de tipo potencial, pero sigue tendiendo a una representación un tanto achatada. Al realizar el ajuste de los datos la Figura 35(b) muestra una alta correlación con R^2 de 0,99 muy semejante a la anterior, pero esta tiende a ser más una recta que una semi-parábola.

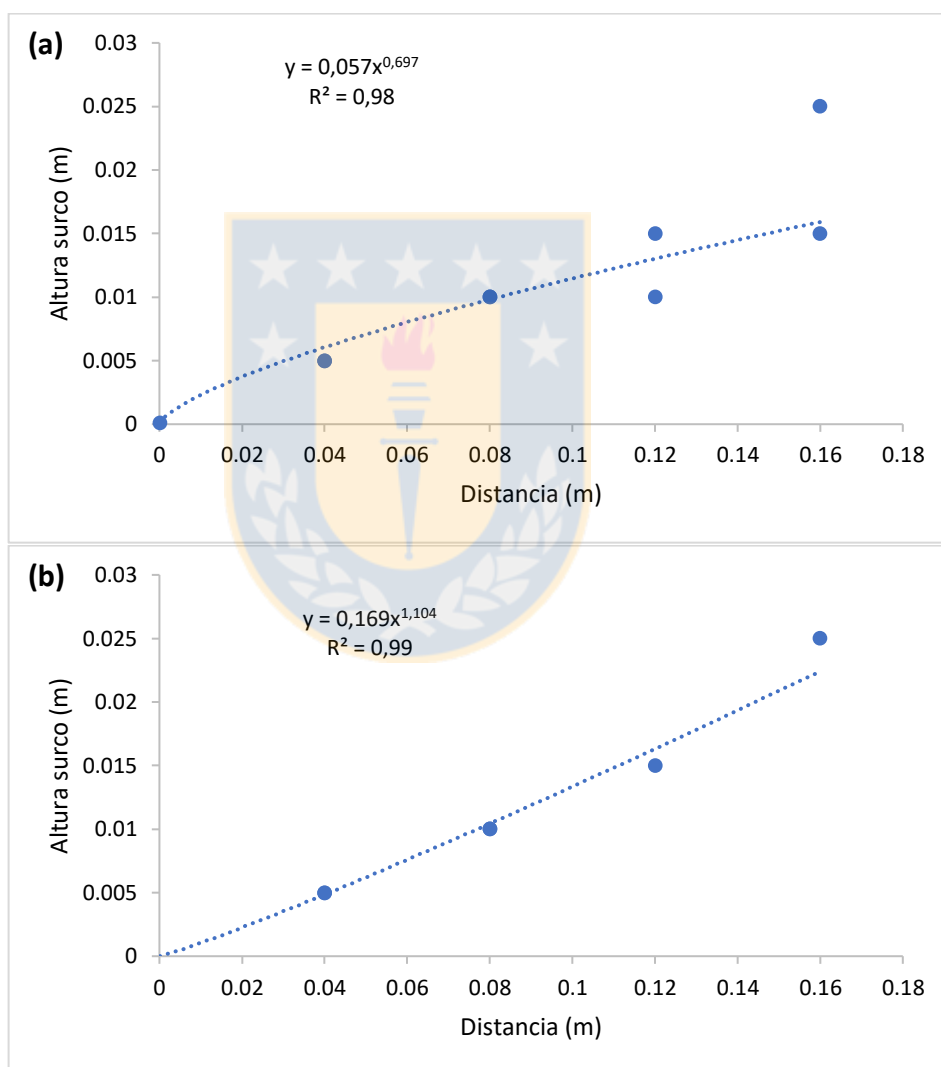


Figura 35. Forma del surco 1 considerando los antecedentes de ambos lados desde el centro. (a) datos en bruto y (b) datos ajustados. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 36(a) se observa una deficiente correlación (R^2) entre los datos y la ecuación de tipo potencial, siendo la representación un poco achatada. Por el contrario, al realizar el ajuste de los datos la Figura 36(b) muestra una alta correlación con R^2 de 0,92 tendiendo a ser una semi-parábola, tal como se puede observar en terreno.

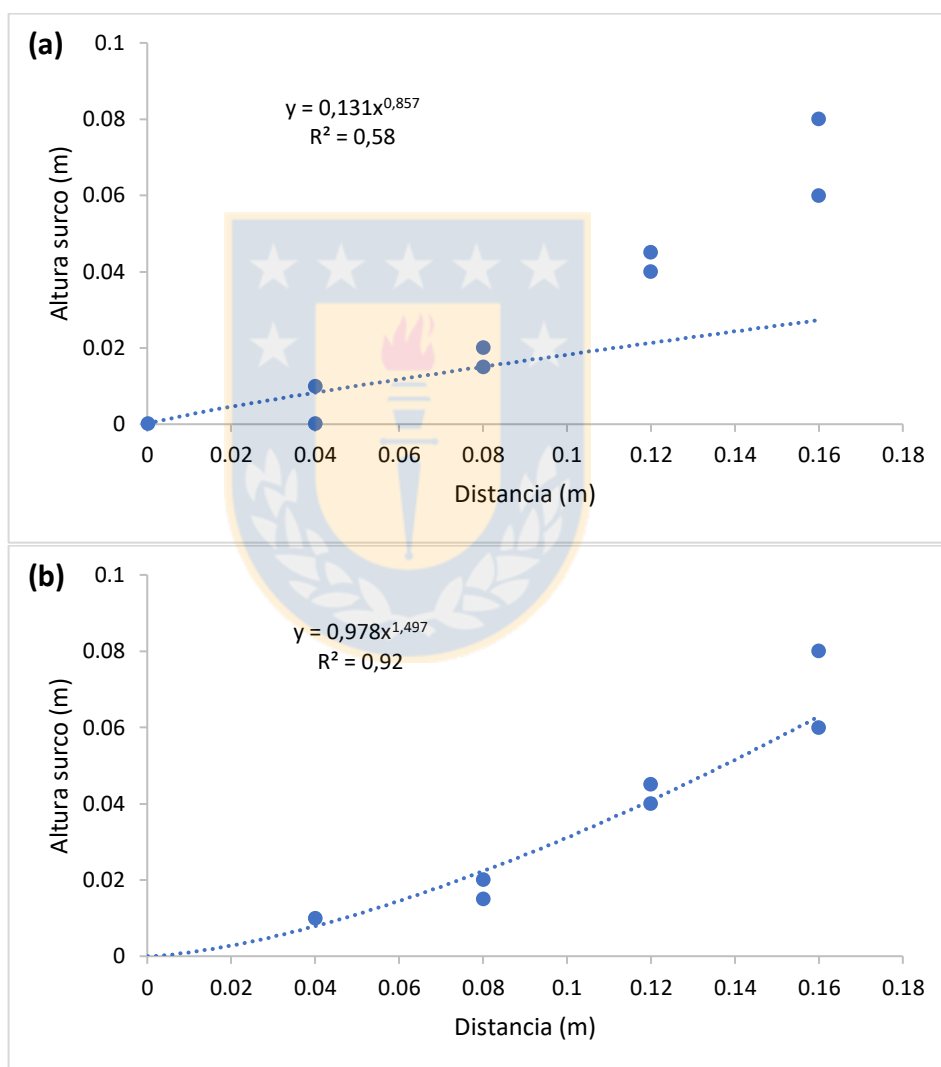


Figura 36. Forma del surco 3 considerando los antecedentes de ambos lados desde el centro. (a) datos en bruto y (b) datos ajustados. Fuente: Elaboración propia.

Las Figuras 37(a) y 37(b) siguen el mismo comportamiento que en las Figuras 36(a) y 36(b) respectivamente, donde se puede observar un bajo grado de correlación en el primer caso y en el segundo al realizar el refinamiento, se da origen a la semi-parábola la cual corresponde a la forma que mejor representa al surco.

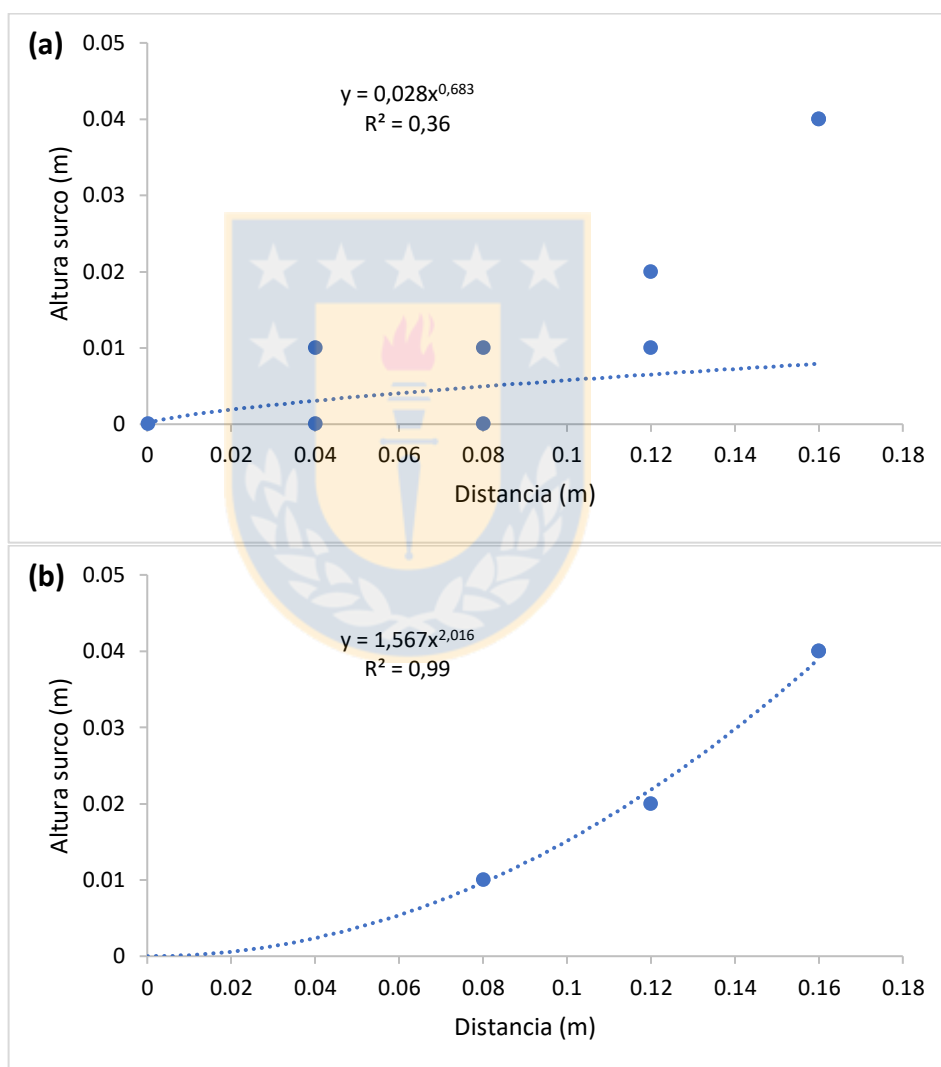


Figura 37. Forma del surco 5 considerando los antecedentes de ambos lados desde el centro. (a) datos en bruto y (b) datos ajustados. Fuente: Elaboración propia.

Utilizando desde la ecuación 10 hasta la ecuación 27, se obtuvieron los factores de forma e hidráulicos del surco, así como también el área de éstos. En la Tabla 11 se entrega un resumen de estos factores para cada caso específico en esta localidad.

Tabla 11. Factores de forma e hidráulicos del surco para caso en bruto y ajustado con su respectiva área en la localidad de Colorado.

Surco	Caso	E_1	E_2	F_1	F_2	Área (m ²)
1	b	49,9846	2,4347	0,0360	2,5485	0,01200
	a	5,2387	1,9059	0,1322	2,6993	0,00948
3	b	9,8602	2,1665	0,0873	2,6164	0,00878
	a	1,2173	1,6679	0,4180	2,7961	0,00680
5	b	154,9296	2,4648	0,0196	2,5411	0,01539
	a	1,0698	1,4962	0,5411	2,8891	0,00808

Como se observa en la Tabla 11 los factores presentan grandes variaciones entre los datos brutos y ajustados, especialmente el factor de forma E_1 en los surcos 1 y 5, siendo el que menos sufre cambios el factor hidráulico F_2 , este suceso se ve reflejado al obtener el área de flujo, ya que esta presenta una disminución de 0,00252 m² en el surco 1, de 0,00198 m² en el surco 3 y de 0,00731 m² en el surco 5 al ajustar los datos. Esta enorme variación produce efectos sobre la infiltración, la cual en varios casos fue imposible de calcular debido a las dimensiones del área.

5.3.2 Fases de riego (avance y receso)

Al comparar las Figuras 38(a) con la 39(a) y la 38(b) con la 39(b) se observa notoriamente la variación al usar las Ecuaciones 1 y 2, donde se ve la influencia del parámetro F_0 , ya que en la Figura 39(a) se hizo imposible obtener los coeficientes A y B presentes en las ecuaciones mencionadas anteriormente. Si bien se tiene una buena estimación de los modelos, fue necesario el ajuste de los datos observándose claramente en la comparación entre la Figura 38(a) con la Figura 38(b).



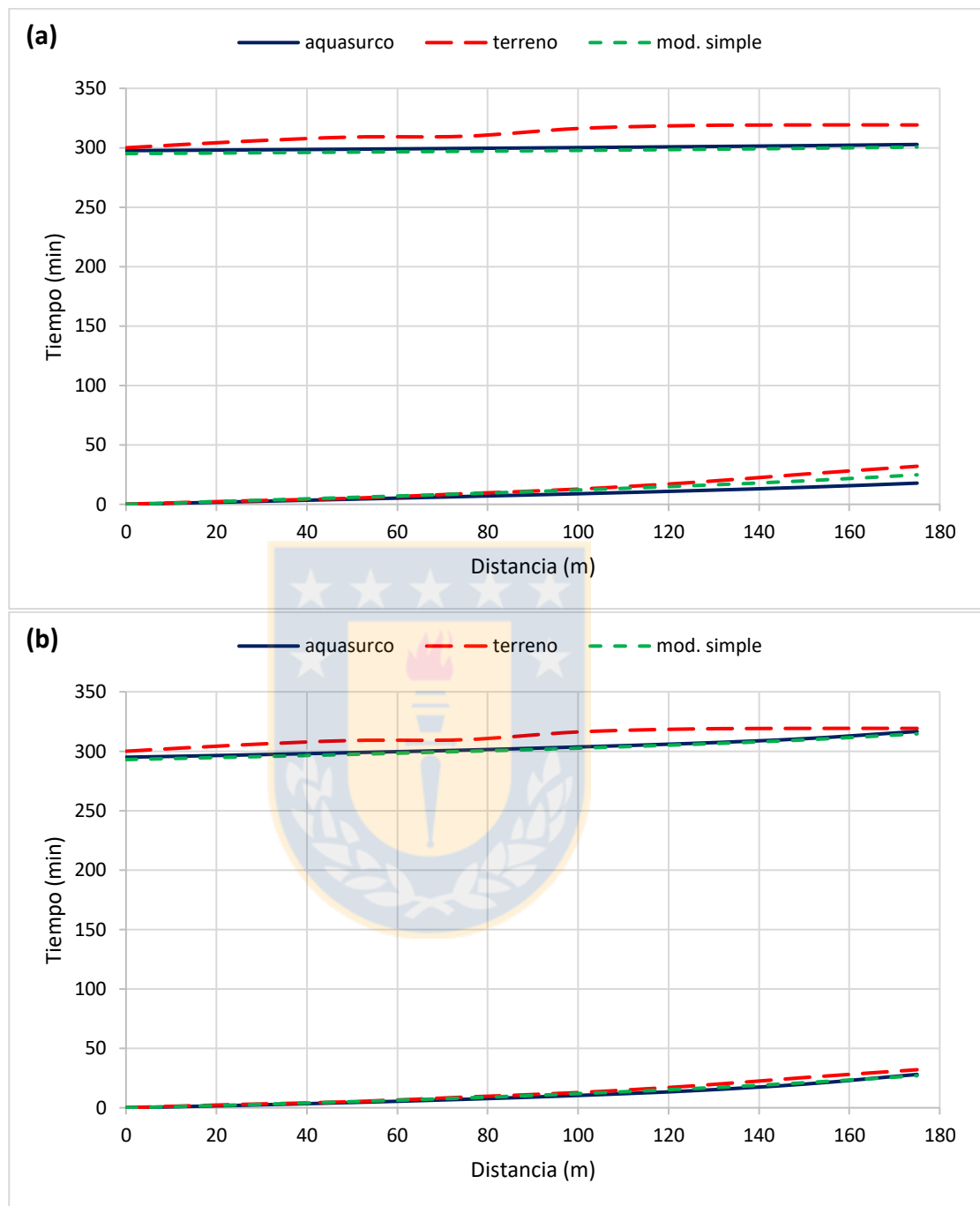


Figura 38. Curvas de avance y receso para el surco 1 sin F0 a partir de los datos entregados y modelos utilizados. (a) datos en bruto y (b) datos ajustados. Fuente: Elaboración propia.

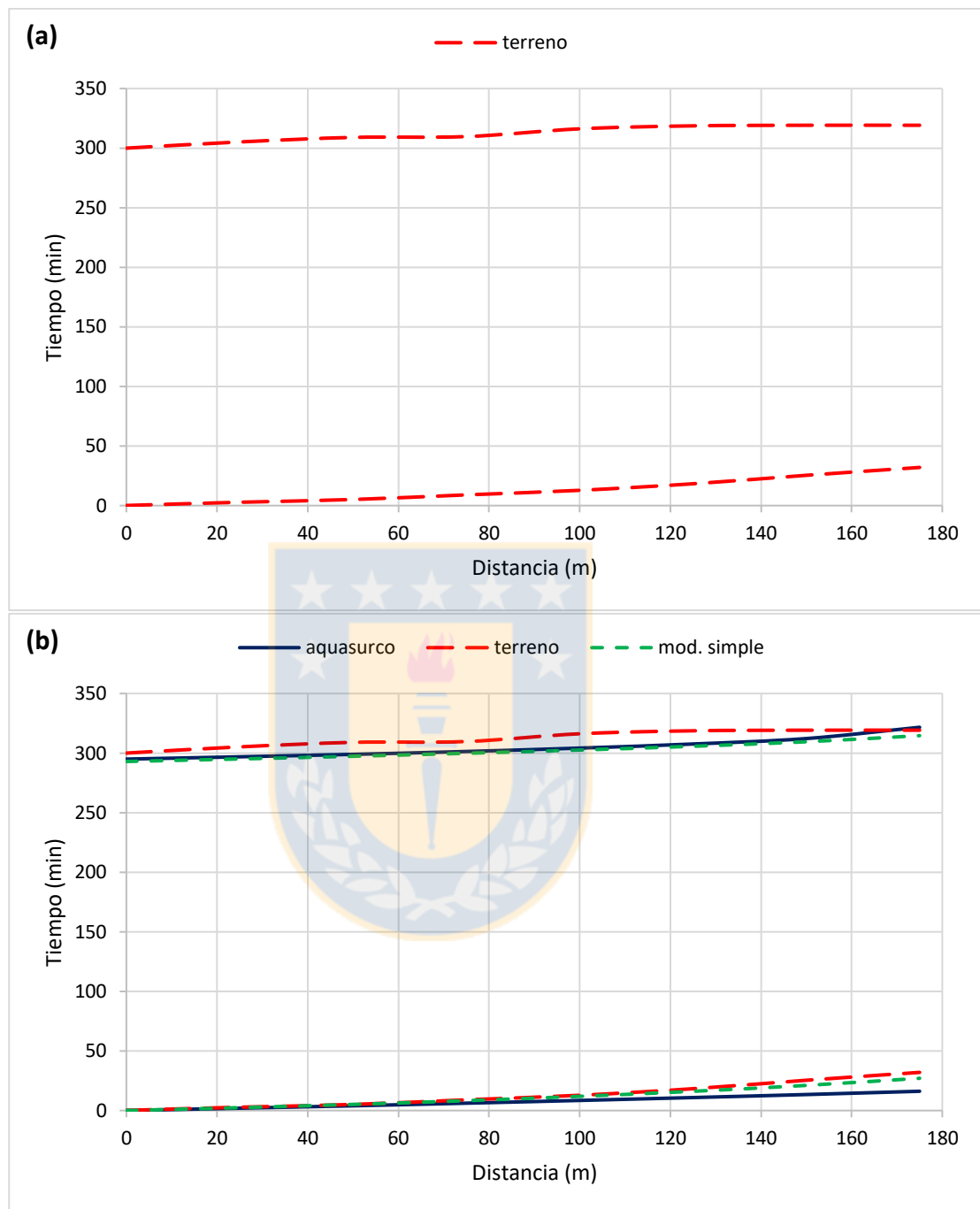


Figura 39. Curvas de avance y receso para el surco 1 con F0 a partir de los datos entregados y modelos utilizados. (a) datos en bruto y (b) datos ajustados. Fuente: Elaboración propia.

Al comparar las Figuras 40(a) con la 41(a) y la Figura 40(b) con la 41(b) se observa notoriamente la variación al usar las Ecuaciones de infiltración 1 y 2, donde se ve la influencia del parámetro F_0 , ya que en la Figura 41(a) se hizo imposible obtener los coeficientes A y B presentes en las ecuaciones mencionadas anteriormente. Si bien se tiene una buena estimación de los modelos, fue necesario el ajuste de los datos observándose claramente en la comparación entre la Figura 40(a) con la Figura 40(b), en donde la fase de avance obtenida a partir del modelo cinemático Aquasurco presentó la mayor variación. Siendo una causal la gran diferencia entre las áreas de flujo determinadas con los datos en bruto y ajustados.



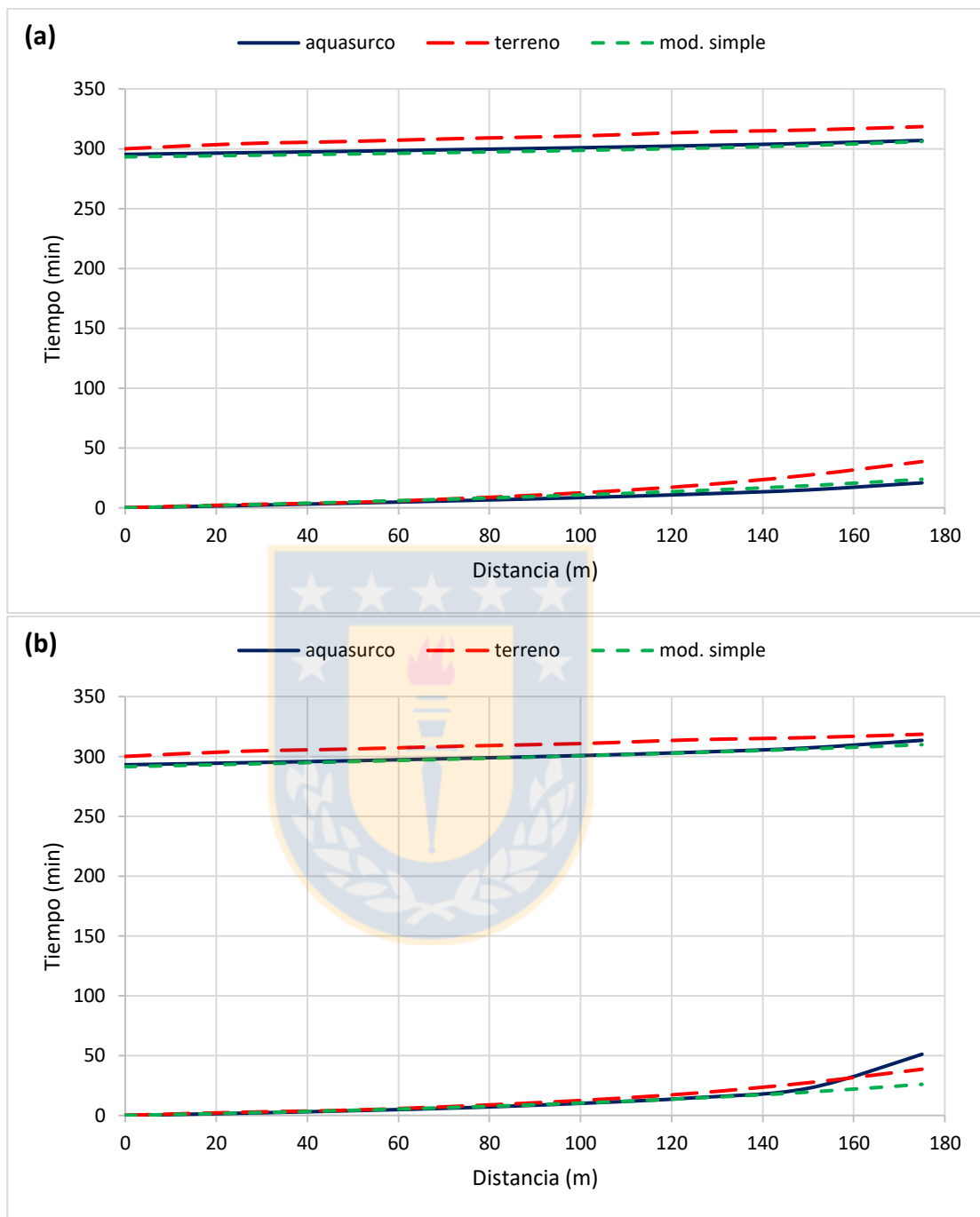


Figura 40. Curvas de avance y receso para el surco 3 sin F0 a partir de los datos entregados y modelos utilizados. (a) datos en bruto y (b) datos ajustados. Fuente: Elaboración propia.

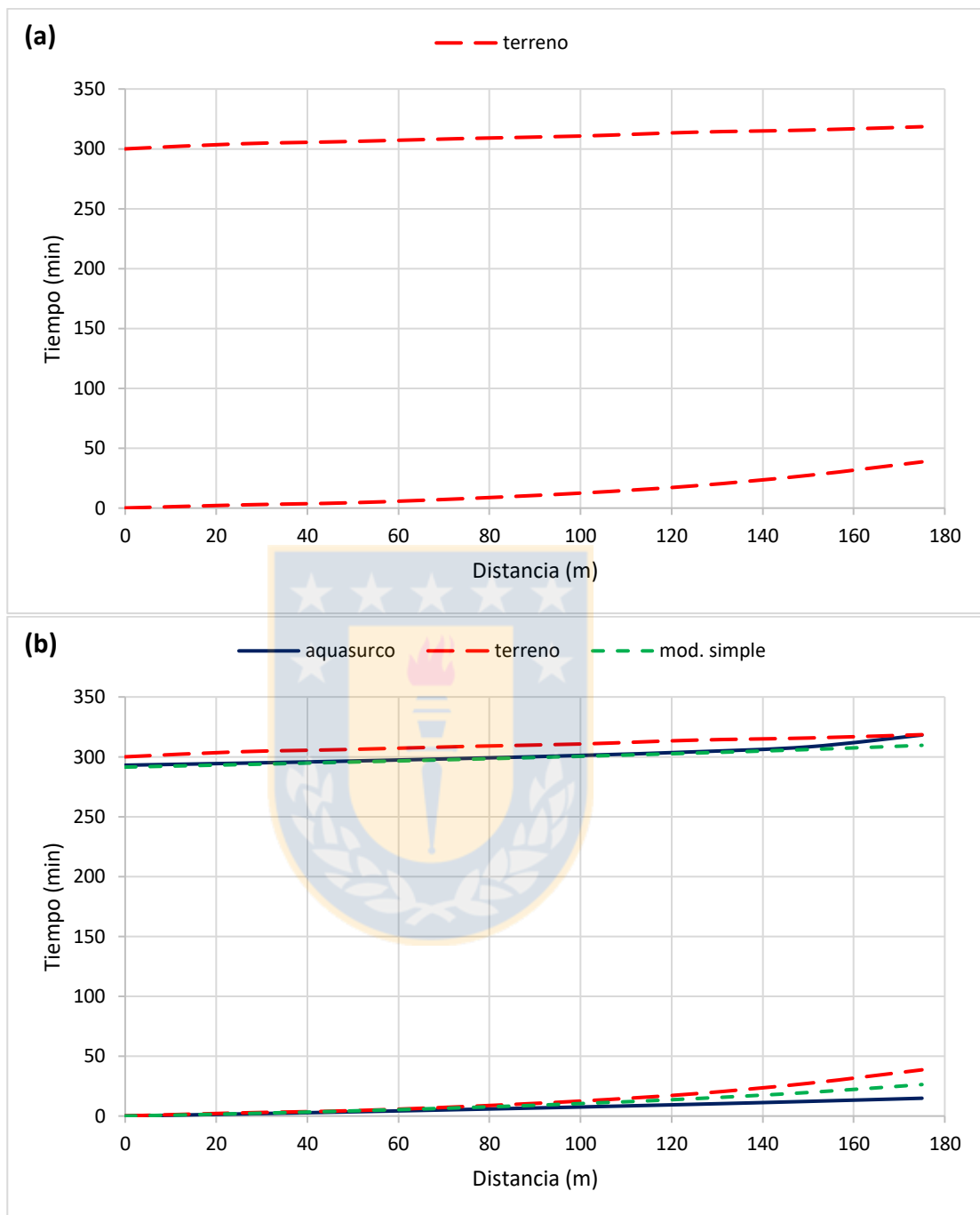


Figura 41. Curvas de avance y receso para el surco 3 con F0 a partir de los datos entregados y modelos utilizados. (a) datos en bruto y (b) datos ajustados. Fuente: Elaboración propia.

En las Figuras 42(a) y 43(a) resultó ser imposible obtener las curvas de avance y receso a partir de los modelos utilizados, esto se debió a la dimensión del área de flujo y la influencia del parámetro F_0 , ya que para estas Figuras no se pudieron determinar los coeficientes A y B presentes en las Ecuaciones de infiltración 1 y 2. Por lo tanto fue necesario el ajuste de los datos observándose claramente que al realizar esta acción las Figuras 42(b) y 43(b), presentaron sus respectivas curvas obtenidas de los modelos. Una de las comparaciones entre estas Figuras ocurre en la fase de avance, debido a las variaciones presentes al utilizar las Ecuaciones de infiltración de Kostiakov y de Kostiakov-Lewis, en donde la fase de avance obtenida a partir del modelo cinemático Aquasurco presentó gran variación a partir de los 120 metros.



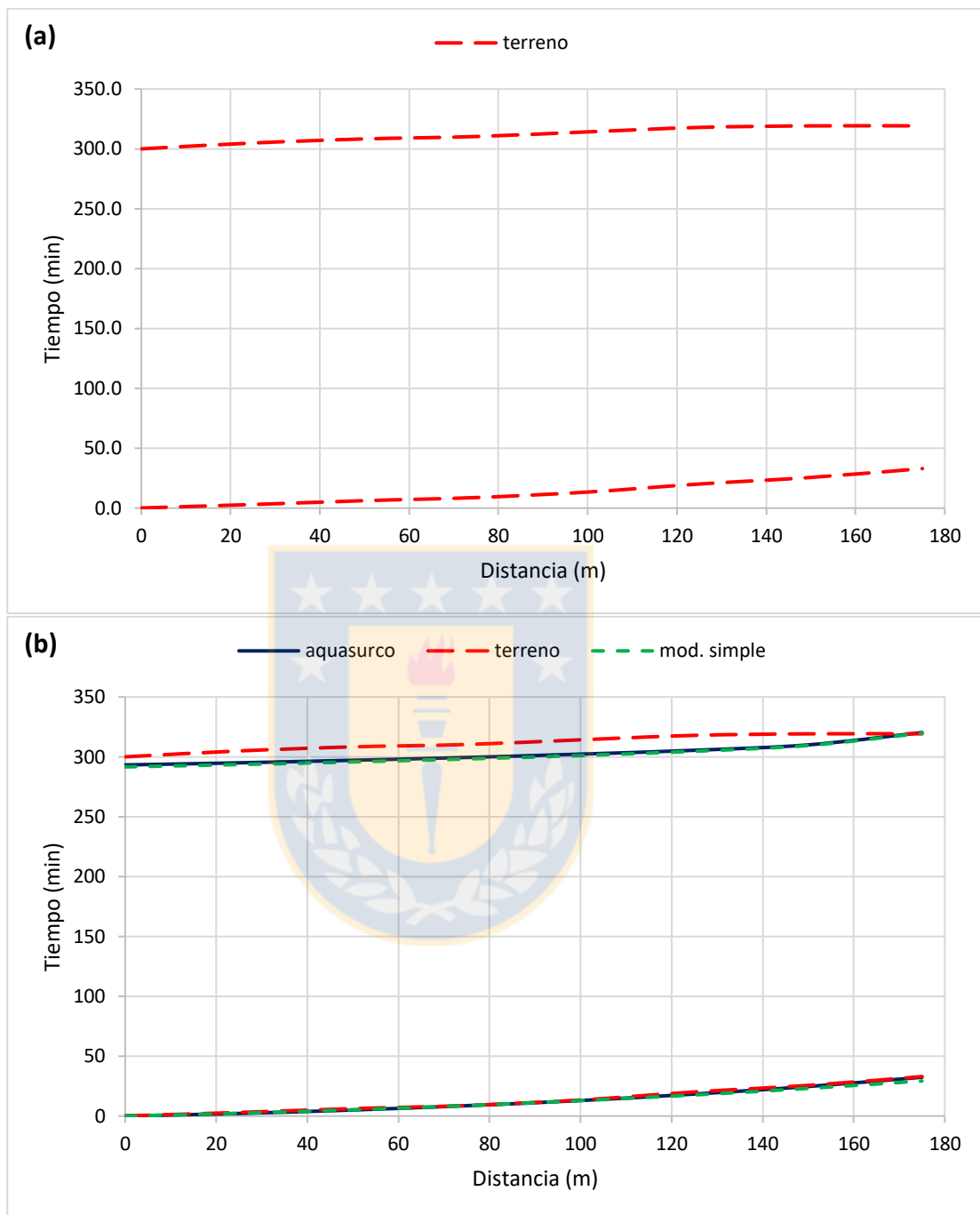


Figura 42. Curvas de avance y receso para el surco 5 sin F0 a partir de los datos entregados y modelos utilizados. (a) datos en bruto y (b) datos ajustados. Fuente: Elaboración propia.

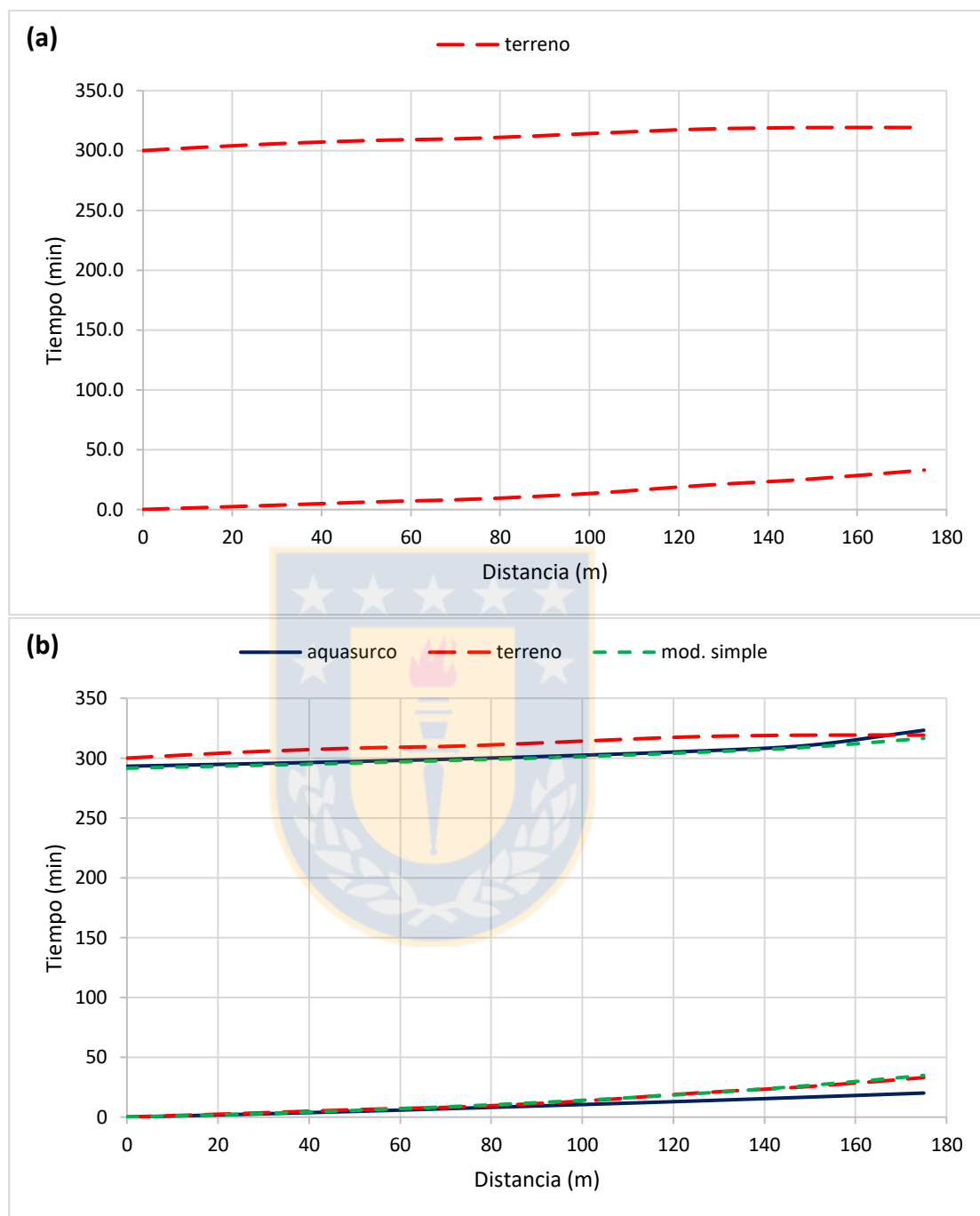


Figura 43. Curvas de avance y receso para el surco 5 con F0 a partir de los datos entregados y modelos utilizados. (a) datos en bruto y (b) datos ajustados. Fuente: Elaboración propia.

Las siguientes Tablas muestran el análisis estadístico realizado tanto para las fases de avance y receso presentado en esta localidad.

Tabla 12. Análisis estadístico para la fase de avance con datos en bruto en la localidad de Colorado.

Modelos	Surco	χ^2	RMSE (min)	MAE (min)	NSE
Aguasurco	1s	0,738	7,012	4,998	0,559
	1c	Npd	Npd	Npd	Npd
	3s	0,929	8,195	5,550	0,572
	3c	Npd	Npd	Npd	Npd
	5s	Npd	Npd	Npd	Npd
	5c	Npd	Npd	Npd	Npd
Simple	1s	0,747	3,388	2,157	0,897
	1c	Npd	Npd	Npd	Npd
	3s	1,476	6,297	3,837	0,747
	3c	Npd	Npd	Npd	Npd
	5s	Npd	Npd	Npd	Npd
	5c	Npd	Npd	Npd	Npd

Donde "s" representa el análisis sin F_0 y "c" el análisis con F_0 . Npd: No presenta datos.

Tabla 13. Análisis estadístico para la fase de avance con datos ajustados en la localidad de Colorado.

Modelos	Surco	χ^2	RMSE (min)	MAE (min)	NSE
Aguasurco	1s	0,220	3,011	2,414	0,919
	1c	0,770	7,728	5,556	0,464
	3s	3,307	5,024	3,295	0,839
	3c	1,885	10,610	7,129	0,282
	5s	0,301	0,905	0,748	0,993
	5c	0,627	6,138	4,351	0,678
Simple	1s	0,228	2,508	1,715	0,944
	1c	0,225	2,479	1,696	0,945
	3s	0,577	5,516	3,575	0,806
	3c	0,548	5,382	3,491	0,815
	5s	0,213	1,869	1,383	0,970
	5c	0,271	0,853	0,709	0,994

Donde "s" representa el análisis sin F_0 y "c" el análisis con F_0 .

Tabla 14. Análisis estadístico para la fase de receso con datos en bruto en la localidad de Colorado.

Modelos	Surco	χ^2	RMSE (min)	MAE (min)	NSE
Aguasurco	1s	0,342	13,292	12,205	-2,814
	1c	Npd	Npd	Npd	Npd
	3s	0,056	9,459	9,201	-1,654
	3c	Npd	Npd	Npd	Npd
	5s	Npd	Npd	Npd	Npd
	5c	Npd	Npd	Npd	Npd
Simple	1s	0,326	15,467	14,578	-4,165
	1c	Npd	Npd	Npd	Npd
	3s	0,047	11,360	11,178	-2,828
	3c	Npd	Npd	Npd	Npd
	5s	Npd	Npd	Npd	Npd
	5c	Npd	Npd	Npd	Npd

Donde "s" representa el análisis sin F_0 y "c" el análisis con F_0 . Npd: No presenta datos.

Tabla 15. Análisis estadístico para la fase de receso con datos ajustados en la localidad de Colorado.

Modelos	Surco	χ^2	RMSE (min)	MAE (min)	NSE
Aguasurco	1s	0,129	9,131	8,568	-0,800
	1c	0,239	8,575	8,044	-0,588
	3s	0,043	9,014	8,839	-1,410
	3c	0,128	8,473	7,901	-1,130
	5s	0,224	9,814	9,174	-1,178
	5c	0,325	9,702	9,346	-1,128
Simple	1s	0,103	10,346	9,957	-1,311
	1c	0,103	10,347	9,958	-1,311
	3s	0,011	9,997	9,961	-1,965
	3c	0,010	10,068	10,034	-2,007
	5s	0,245	10,889	10,140	-1,681
	5c	0,144	10,845	10,342	-1,659

Donde "s" representa el análisis sin F_0 y "c" el análisis con F_0 .

Según los resultados de los análisis que fueron posibles de obtener en la Tabla 12 y comparándolos con la Tabla 13, se aprecia una buena aceptación del

modelo Aquasurco, pero también se observa que en algunos casos el modelo de avance simple tiende a presentar mejores correlaciones, asemejándose más a los datos de terreno. En cuanto a los análisis realizados para el receso en las Tablas 14 y 15, se observa que el modelo simple en la gran mayoría de los casos analizados presenta una mejor correlación y semejanza a los datos de terreno en esta localidad, aun cuando el coeficiente de Nash-Sutcliffe indica que la media de los datos de terreno son una mejor predicción que los modelos ($NSE < 0$).

Se puede apreciar que en cuanto al ajuste de la geometría del surco para la obtención de los factores de forma e hidráulicos, la gran variación de estos produjo una disminución considerable en las áreas de los surcos, los cuales presentan grandes efectos en cuanto a los análisis, pudiéndose decir que en este caso era necesario el ajuste de los datos, e incluso se deben aplicar mejoras en cuanto a las mediciones.

También queda en evidencia las variaciones que se producen en las fases de avance y receso al utilizar la Ecuación 1 y la Ecuación 2, debido al F_0 .

5.4 Localidad 4: Colorado

Los antecedentes para el análisis en esta localidad consideran un suelo de tipo franco arenosa, el cual ya presenta 2 sucesos de riego, con una pendiente de $0,0043 \text{ m m}^{-1}$ y un largo de surco de 175 m.

5.4.1 Forma del surco

Se observa en la Figura 44, que la geometría de los surcos se presenta con una forma parabólica para todos estos. Sin embargo, se aprecia que el surco 5 tiene elevaciones lineales y sin imperfecciones, sugiriendo que en esta sección tendería a una forma un tanto triangular.

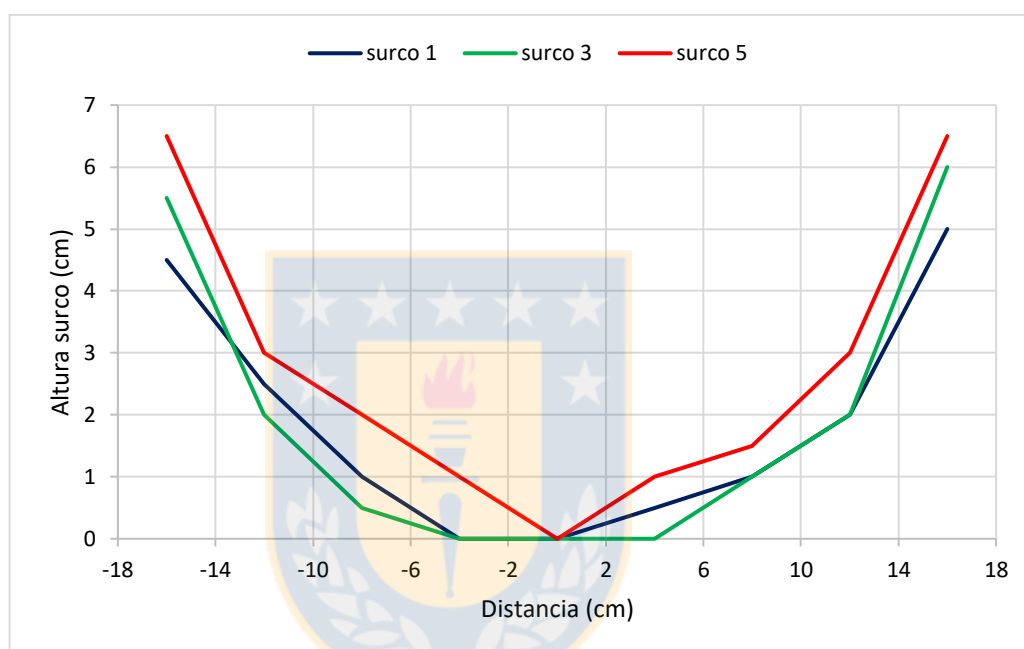


Figura 44. Geometría de surco observada en la localidad de Colorado con fecha 24 de junio de 1977. Fuente: Elaboración propia.

Siguiendo la metodología para la determinación de los factores de forma del surco, se obtuvo la representación de tipo potencial para cada surco, tal como lo menciona Brown-Manrique *et al.* (2019), Karmeli (1978), Mostafazadefard (1982). En las Figuras 45, 46, 47 se muestra esta representación de tipo potencial.

En la Figura 45(a) se observa una deficiente correlación (R^2) entre los datos y la ecuación de tipo potencial, obteniendo una representación un tanto

achatada. Por el contrario, al realizar el ajuste de los datos la Figura 45(b) muestra una alta correlación con R^2 de 0,95 tendiendo a ser una semi-parábola, tal como se asume en la metodología y que se aproxima mejor a lo que se observa en terreno.

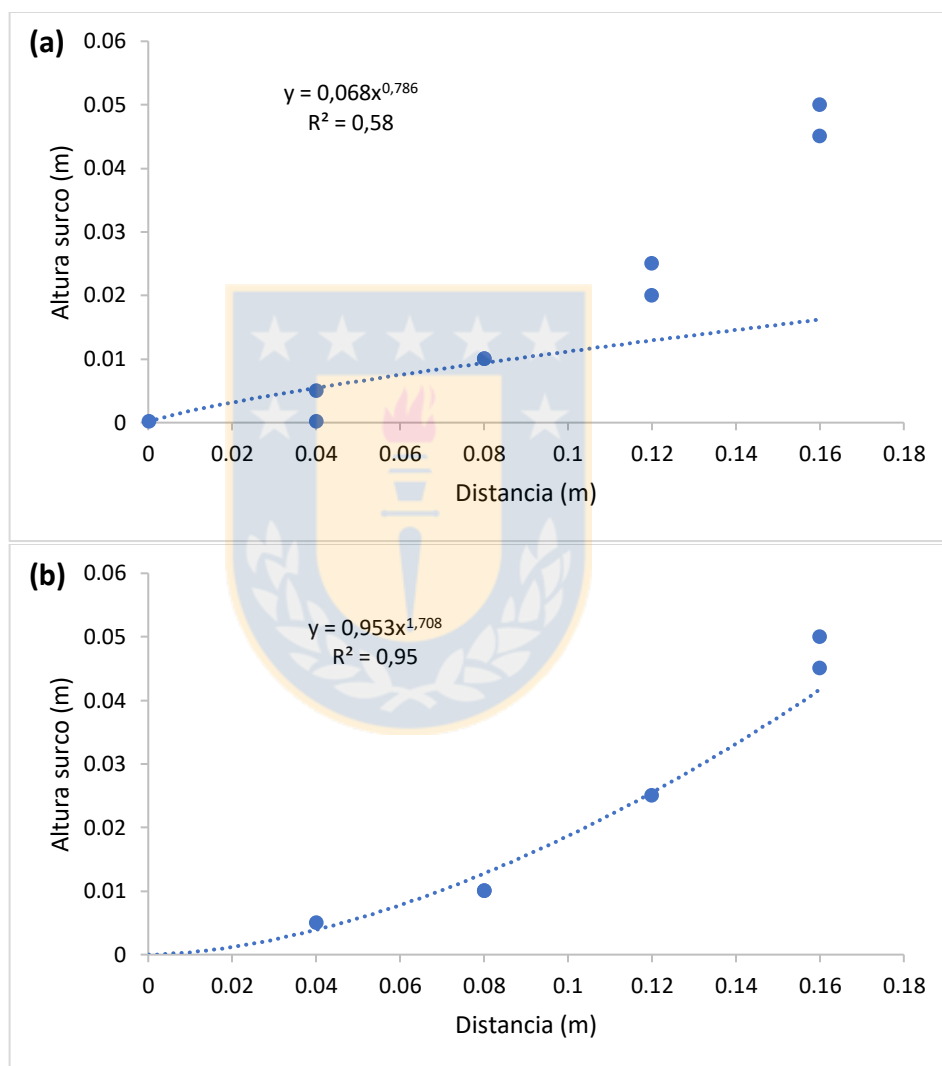


Figura 45. Forma del surco 1 considerando los antecedentes de ambos lados desde el centro. (a) datos en bruto y (b) datos ajustados. Fuente: Elaboración propia.

Las Figuras 46(a) y 46(b) siguen el mismo comportamiento que en la Figura 45(a) y 45(b) respectivamente, donde se puede observar un bajo grado de correlación en el primer caso y en el segundo al realizar el ajuste de datos, se da origen a la semi-parábola la cual corresponde mejor a la forma que tienen los surcos de riego.

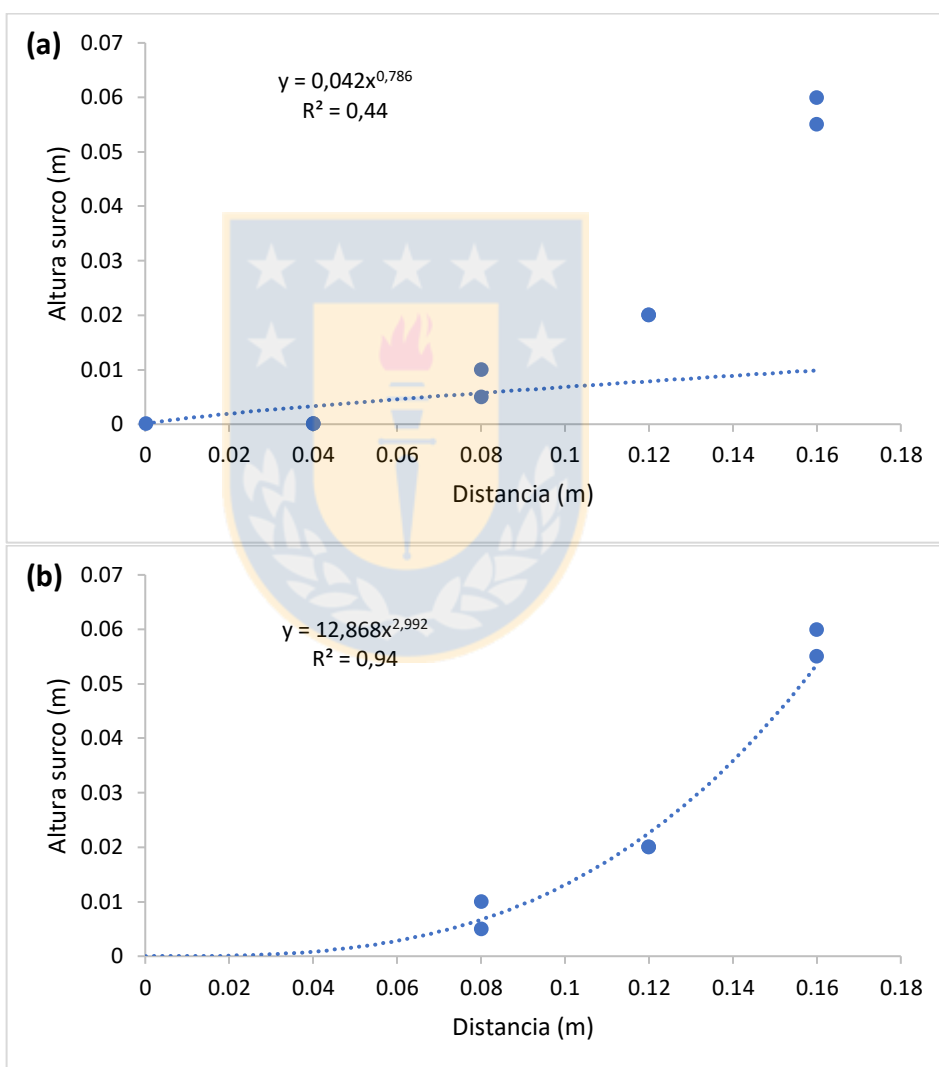


Figura 46. Forma del surco 3 considerando los antecedentes de ambos lados desde el centro. (a) datos en bruto y (b) datos ajustados. Fuente: Elaboración propia.

Así como se presentó tanto en las Figuras 45 y 46, la Figura 47 sigue el mismo comportamiento que las dos mencionadas anteriormente. Teniendo una baja correlación con los datos en bruto y una alta correlación incluyendo la forma semi-parabólica con los datos ajustados.

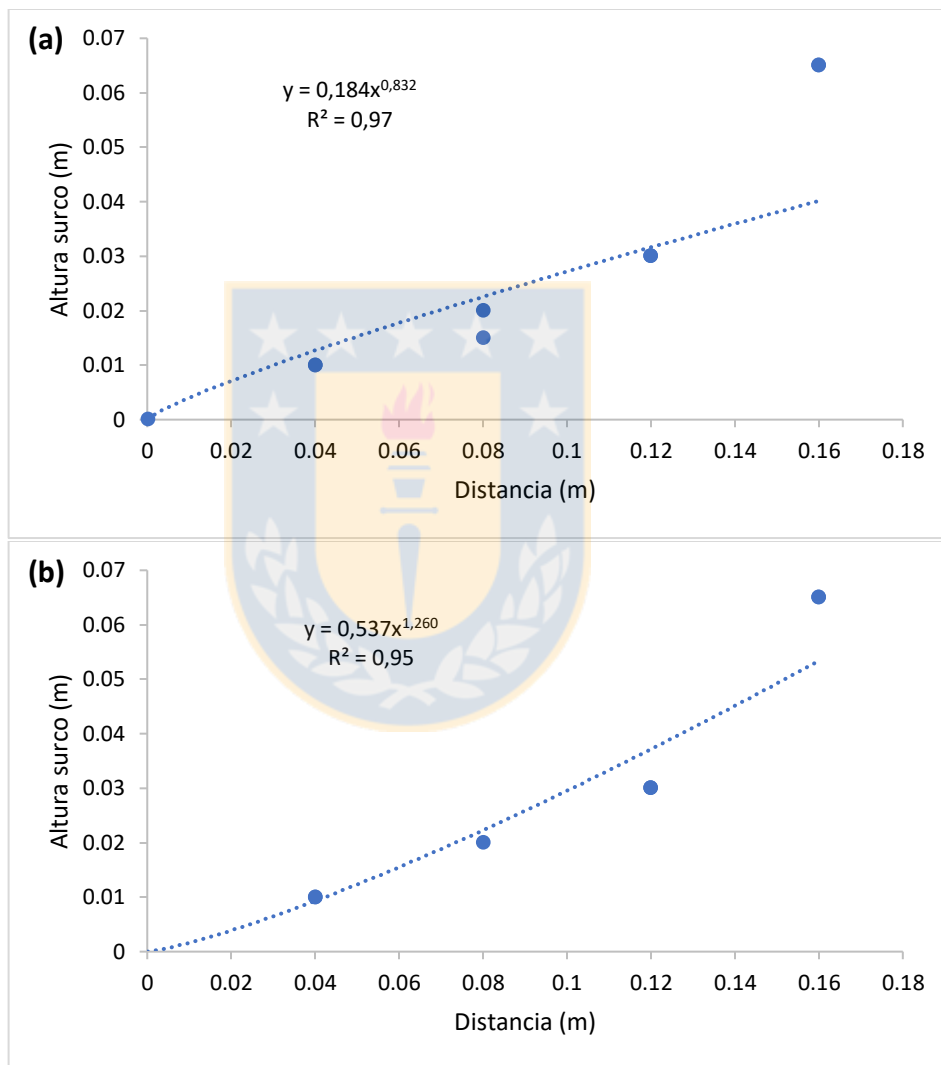


Figura 47. Forma del surco 5 considerando los antecedentes de ambos lados desde el centro. (a) datos en bruto y (b) datos ajustados. Fuente: Elaboración propia.

Utilizando desde la ecuación 10 hasta la ecuación 27, se obtuvieron los factores de forma e hidráulicos del surco, así como también el área de éstos. En la Tabla 16 se entrega un resumen de estos factores para cada caso específico en esta localidad.

Tabla 16. Factores de forma e hidráulicos del surco para caso en bruto y ajustado con su respectiva área en la localidad de Colorado.

Surco	Caso	E ₁	E ₂	F ₁	F ₂	Área (m ²)
1	b	26,6782	2,2719	0,0488	2,5874	0,00681
	a	1,2972	1,5855	0,4266	2,8389	0,00494
3	b	50,1469	2,2725	0,0337	2,5869	0,00769
	a	0,6383	1,3342	1,0451	2,9967	0,00475
5	b	6,9289	2,2020	0,1089	2,6087	0,00615
	a	1,8256	1,7937	0,2856	2,7411	0,00554

Como se puede observar en la Tabla 16 los factores presentaron grandes variaciones entre los datos brutos y ajustados en los surcos 1 y 3, siendo el que menos sufre cambios el factor hidráulico F₂, este suceso se ve reflejado al momento de obtener el área, ya que esta presenta una disminución de 0,00187 m² en el surco 1, de 0,00294 m² en el surco 3 y de 0,00061 m² en el surco 5 al ajustar los datos.

5.4.2 Fases de riego (avance y receso)

Al comparar las Figuras 48(a) con 48(b) y 49(a) con 49(b) se observan leves cambios tanto en las fases de avance como de receso obtenidas del modelo cinemático Aquasurco, esto es debido al ajuste realizado en la geometría del surco, teniendo visualmente el modelo simple una mejor estimación. En cuanto a la comparación entre las Figuras 48 y 49, se logran ver algunas diferencias en las fases de avance obtenidas del modelo Aquasurco, producido por la variación entre las Ecuaciones de infiltración 1 y 2, donde influye el parámetro F_0 .



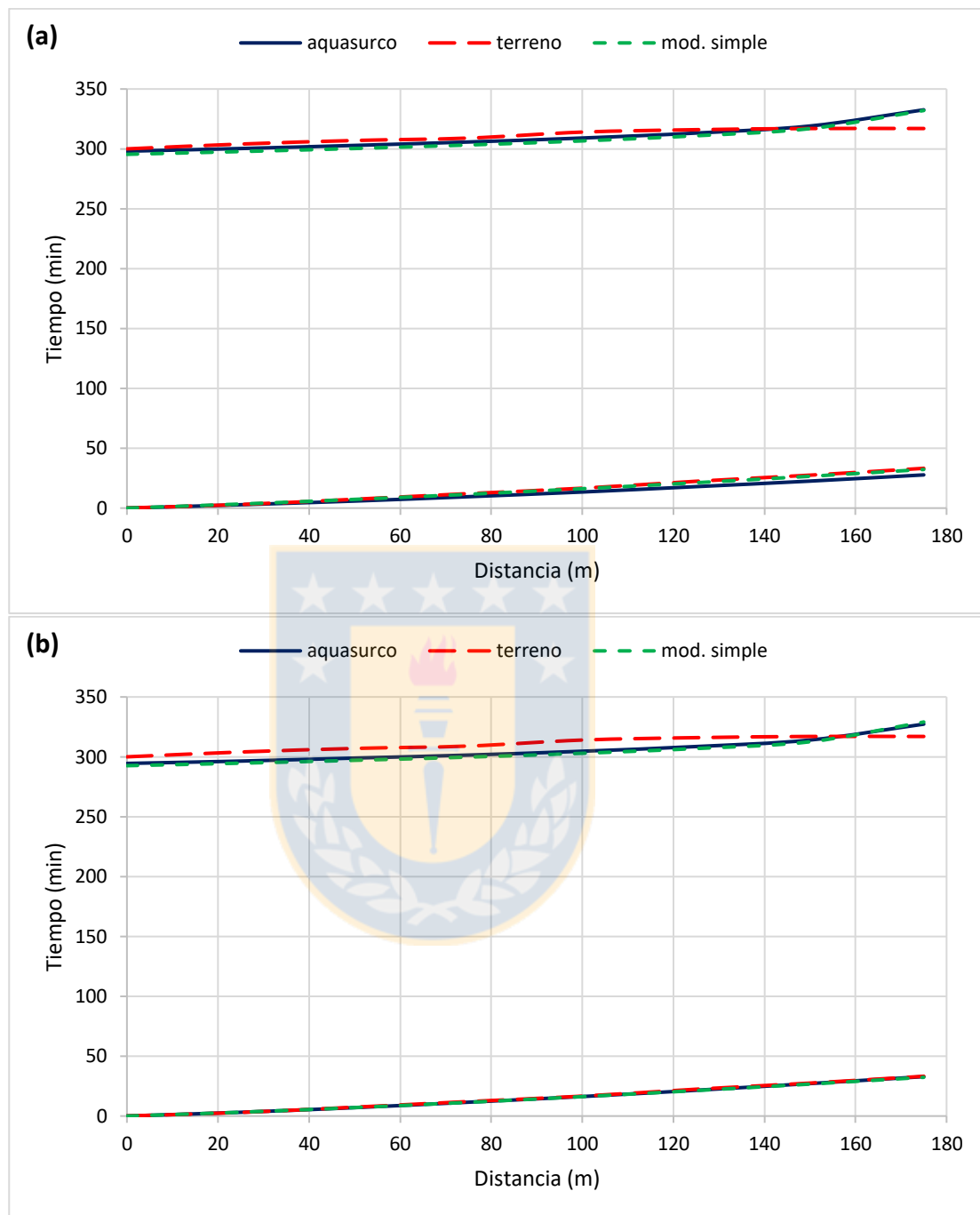


Figura 48. Curvas de avance y receso para el surco 1 sin F0 a partir de los datos entregados y modelos utilizados. (a) datos en bruto y (b) datos ajustados. Fuente: Elaboración propia.

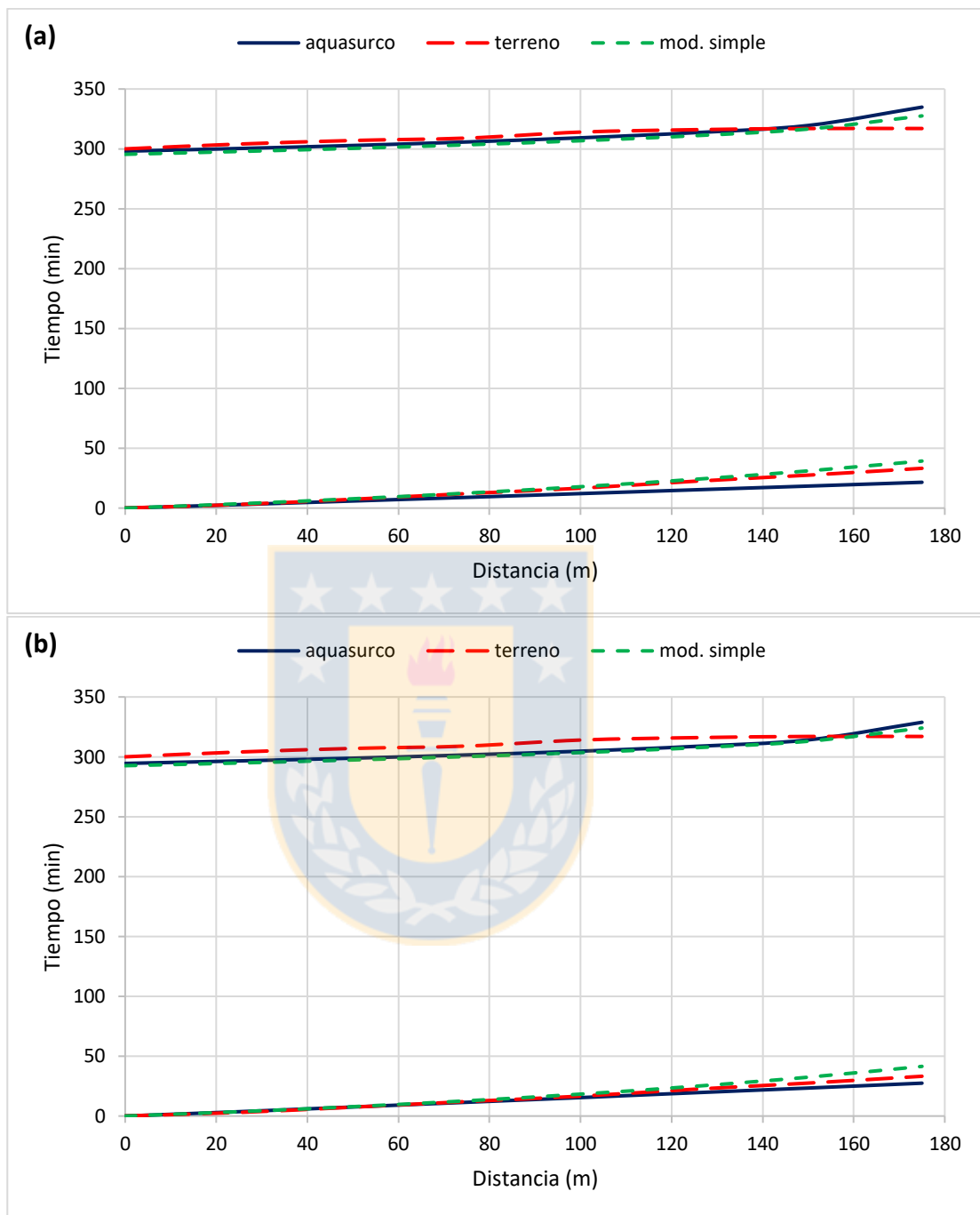
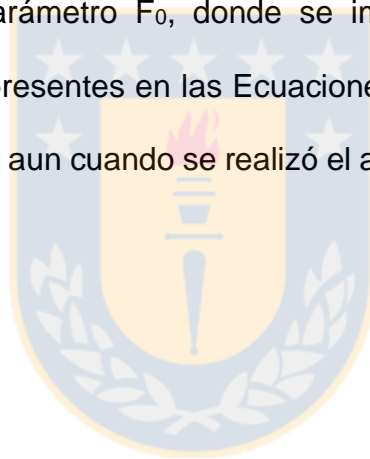


Figura 49. Curvas de avance y receso para el surco 1 con F0 a partir de los datos entregados y modelos utilizados. (a) datos en bruto y (b) datos ajustados. Fuente: Elaboración propia.

Al comparar la Figura 50(a) con la 50(b) se observan leves cambios en la fase de avance obtenidas del modelo cinemático Aquasurco, esto es debido al ajuste realizado en la geometría del surco, teniendo visualmente el modelo simple una mejor estimación. También es notoria la variación en la fase de receso, ya que en la Figura 50(a) la curva de receso obtenida de los modelos comienza a alejarse de los datos de terreno a partir de los 140 metros, mientras que en la Figura 50(b) esta se aleja desde los 160 metros. En cuanto a las Figuras 51(a) y 51(b), es imposible obtener una comparación, esto se debe a la influencia del parámetro F_0 , donde se imposibilitó la obtención de los coeficientes A y B presentes en las Ecuaciones de infiltración de Kostiakov y de Kostiakov-Lewis, aun cuando se realizó el ajuste de la geometría del surco.



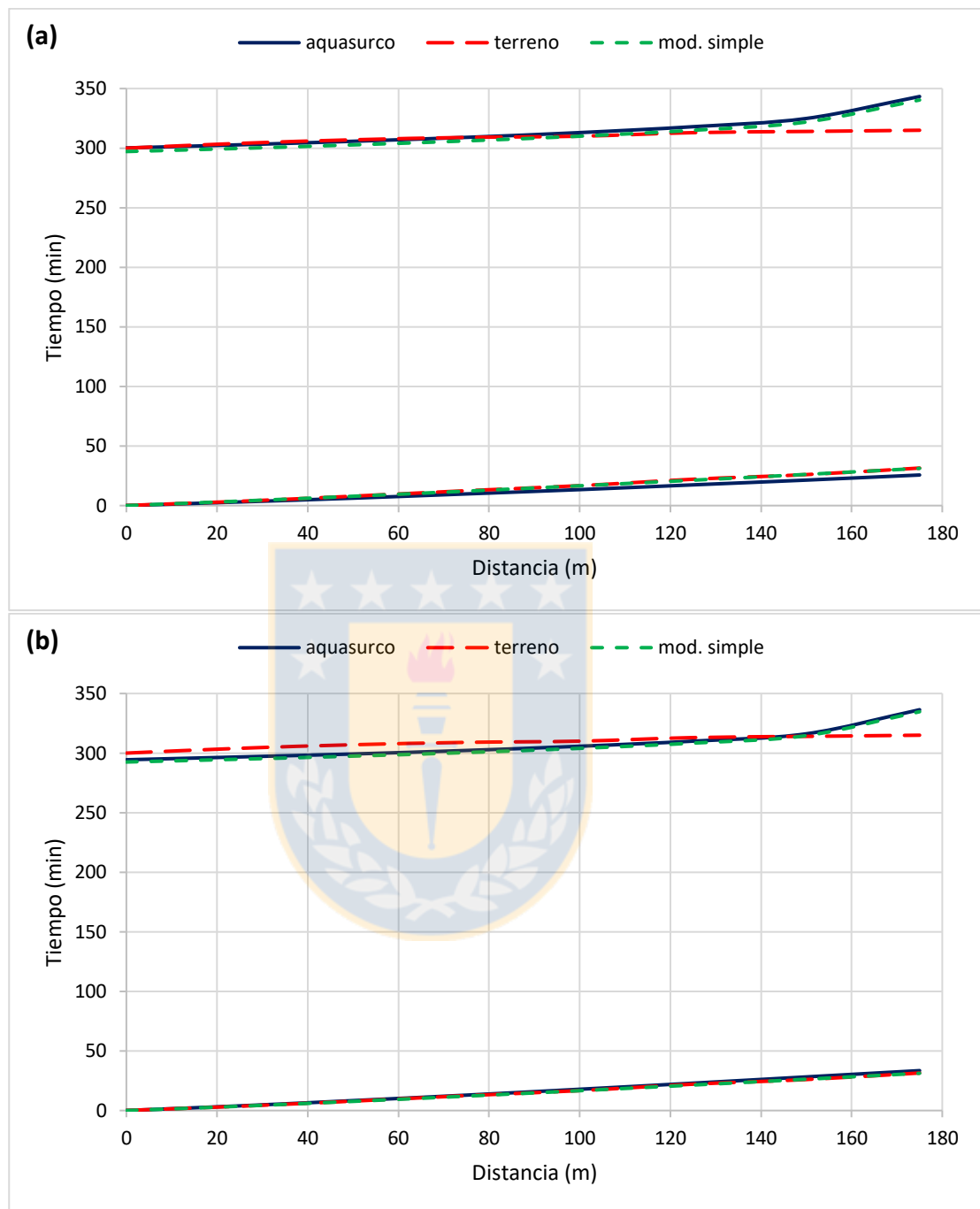


Figura 50. Curvas de avance y receso para el surco 3 sin F0 a partir de los datos entregados y modelos utilizados. (a) datos en bruto y (b) datos ajustados. Fuente: Elaboración propia.

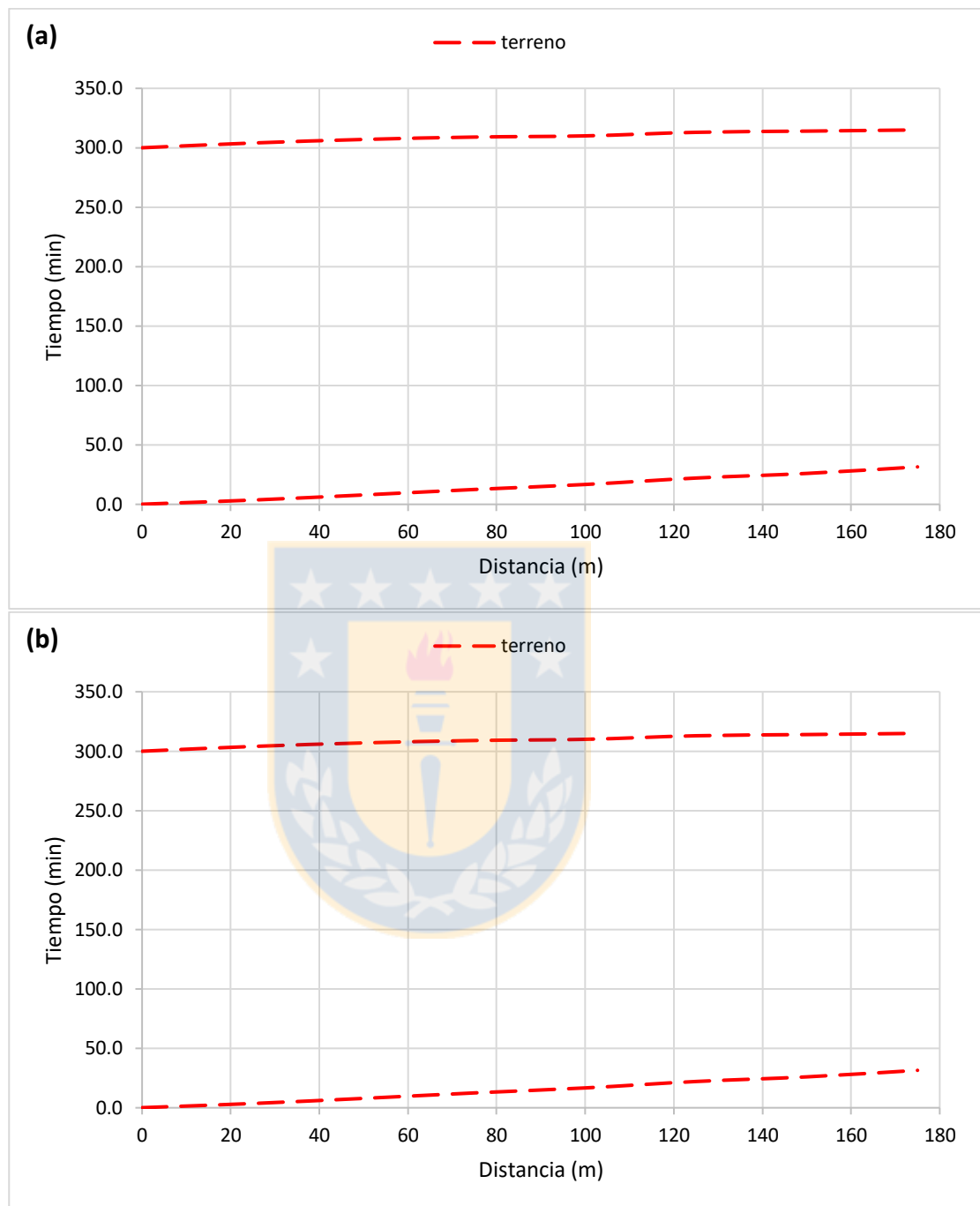
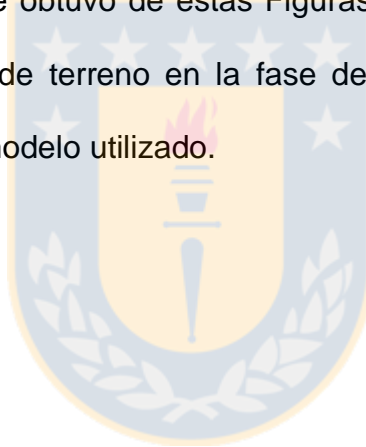


Figura 51. Curvas de avance y receso para el surco 3 con F0 a partir de los datos entregados y modelos utilizados. (a) datos en bruto y (b) datos ajustados. Fuente: Elaboración propia.

Al comparar las Figuras 52(a) con 52(b) y 53(a) con 53(b), no se observan variaciones en las curvas tanto de avance como de receso obtenidas por los modelos utilizados, dando a entender que visualmente no es influyente el ajuste realizado en la geometría del surco. En cuanto a la comparativa entre las Figuras 52 y 53 no se aprecia una variación de las curvas, es decir que el utilizar las Ecuaciones de infiltración de Kostiakov y de Kostiakov-Lewis en este caso no afecta visualmente, es por esto que se realiza el acompañamiento del análisis estadístico.

Otro análisis que se obtuvo de estas Figuras, es que se presenta un mejor ajuste a los datos de terreno en la fase de avance que en la de receso, independiente del modelo utilizado.



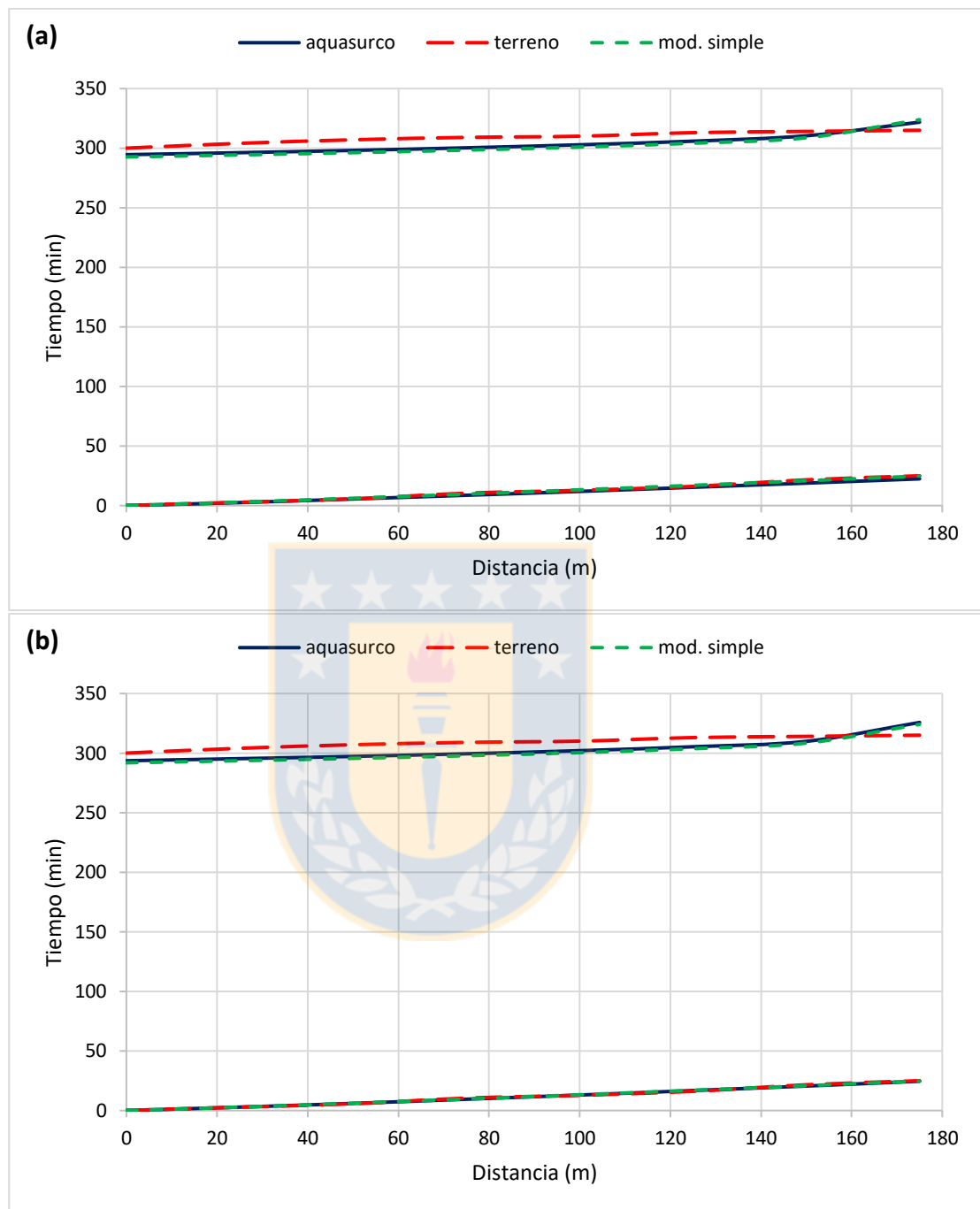


Figura 52. Curvas de avance y receso para el surco 5 sin F0 a partir de los datos entregados y modelos utilizados. (a) datos en bruto y (b) datos ajustados. Fuente: Elaboración propia.

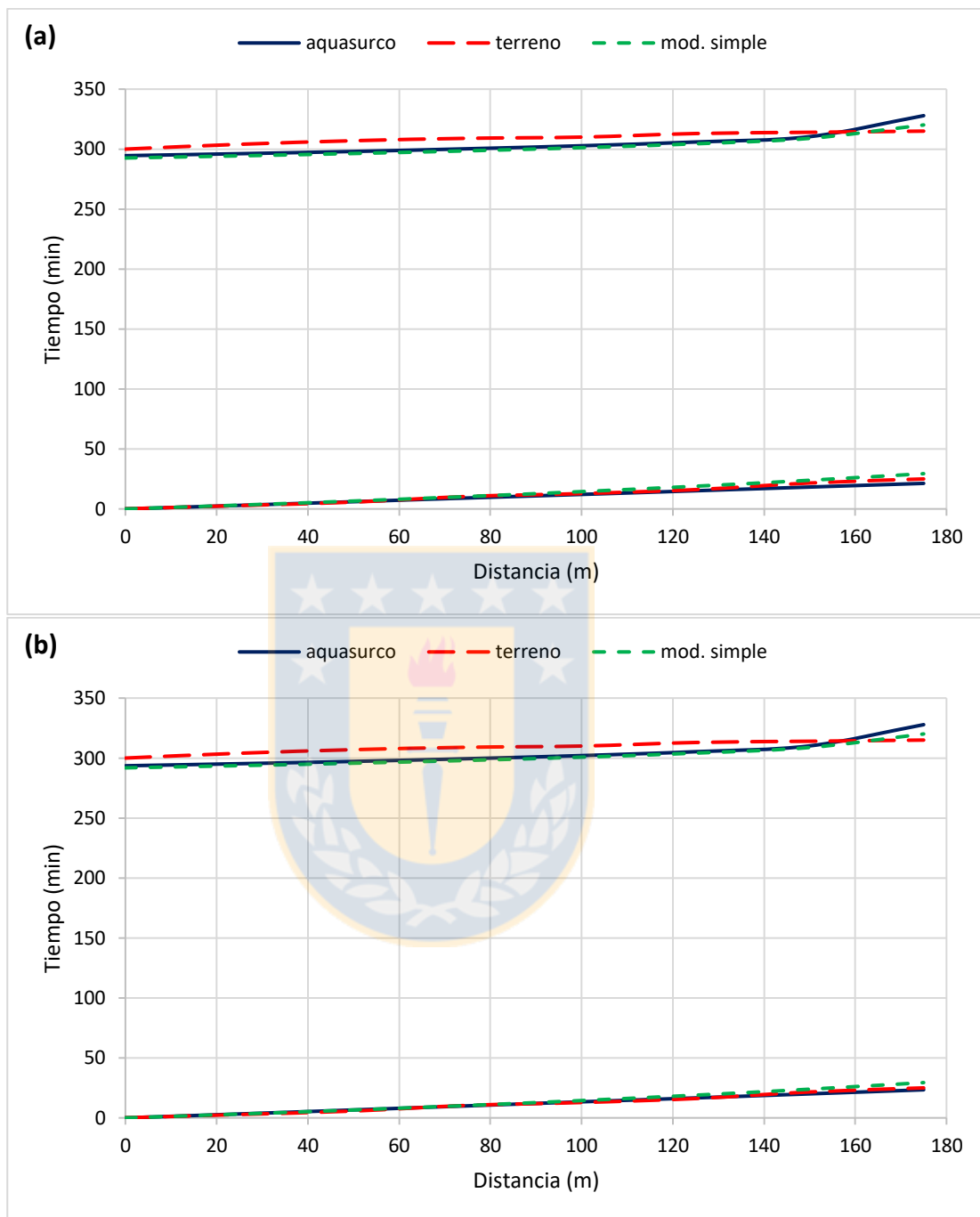


Figura 53. Curvas de avance y receso para el surco 5 con F0 a partir de los datos entregados y modelos utilizados. (a) datos en bruto y (b) datos ajustados. Fuente: Elaboración propia.

Las siguientes Tablas muestran el análisis estadístico realizado tanto para las fases de avance y receso presentado en esta localidad.

Tabla 17. Análisis estadístico para la fase de avance con datos en bruto en la localidad de Colorado.

Modelos	Surco	χ^2	RMSE (min)	MAE (min)	NSE
Aguasurco	1s	0,130	3,422	2,810	0,904
	1c	0,416	6,148	4,655	0,690
	3s	0,103	3,515	2,939	0,884
	3c	Npd	Npd	Npd	Npd
	5s	0,178	1,532	1,163	0,966
	5c	0,312	1,872	1,323	0,949
Simple	1s	0,144	0,696	0,582	0,996
	1c	0,267	2,609	1,745	0,944
	3s	0,118	0,339	0,255	0,999
	3c	Npd	Npd	Npd	Npd
	5s	0,195	0,550	0,463	0,996
	5c	0,240	2,124	1,569	0,934

Donde "s" representa el análisis sin F_0 y "c" el análisis con F_0 . Npd: No presenta datos.

Tabla 18. Análisis estadístico para la fase de avance con datos ajustados en la localidad de Colorado.

Modelos	Surco	χ^2	RMSE (min)	MAE (min)	NSE
Aguasurco	1s	0,120	0,448	0,385	0,998
	1c	0,471	2,763	1,943	0,937
	3s	0,124	1,194	0,934	0,987
	3c	Npd	Npd	Npd	Npd
	5s	0,186	0,583	0,464	0,995
	5c	0,339	0,930	0,773	0,987
Simple	1s	0,118	0,650	0,555	0,997
	1c	0,361	3,575	2,383	0,895
	3s	0,115	0,335	0,258	0,999
	3c	Npd	Npd	Npd	Npd
	5s	0,194	0,549	0,459	0,996
	5c	0,241	2,134	1,575	0,933

Donde "s" representa el análisis sin F_0 y "c" el análisis con F_0 . Npd: No presenta datos.

Tabla 19. Análisis estadístico para la fase de receso con datos en bruto en la localidad de Colorado.

Modelos	Surco	χ^2	RMSE (min)	MAE (min)	NSE
Aguasurco	1s	0,506	6,379	4,806	-0,107
	1c	0,620	7,065	5,085	-0,358
	3s	1,058	10,943	6,239	-4,096
	3c	Npd	Npd	Npd	Npd
	5s	0,308	7,150	6,963	-1,176
	5c	0,590	8,122	7,714	-1,807
Simple	1s	0,617	7,441	6,343	-0,507
	1c	0,390	6,345	5,767	-0,095
	3s	1,088	9,779	6,201	-3,069
	3c	Npd	Npd	Npd	Npd
	5s	0,489	8,999	8,842	-2,446
	5c	0,315	8,457	8,203	-2,043

Donde "s" representa el análisis sin F_0 y "c" el análisis con F_0 . Npd: No presenta datos.

Tabla 20. Análisis estadístico para la fase de receso con datos ajustados en la localidad de Colorado.

Modelos	Surco	χ^2	RMSE (min)	MAE (min)	NSE
Aguasurco	1s	0,459	7,630	7,333	-0,584
	1c	0,533	7,865	7,475	-0,683
	3s	1,043	9,214	7,278	-2,613
	3c	Npd	Npd	Npd	Npd
	5s	0,524	8,364	8,131	-1,977
	5c	0,638	8,701	8,348	-2,222
Simple	1s	0,653	9,330	9,072	-1,369
	1c	0,381	8,337	8,121	-0,891
	3s	1,072	9,698	8,231	-3,003
	3c	Npd	Npd	Npd	Npd
	5s	0,535	9,534	9,371	-2,868
	5c	0,341	8,934	8,647	-2,396

Donde "s" representa el análisis sin F_0 y "c" el análisis con F_0 . Npd: No presenta datos.

Al analizar los resultados de la Tabla 17 y 18, se aprecia una buena correlación y aceptación del modelo Aguasurco, así como también del modelo de avance

simple, donde ambos se asemejan a los datos de terreno. En cuanto a los análisis realizados para el receso en las Tablas 19 y 20, se observa que el modelo simple en la gran mayoría de los casos analizados presenta una mejor correlación y semejanza a los datos de terreno en esta localidad, aun cuando el coeficiente de Nash-Sutcliffe indica que la media de los datos de terreno son una mejor predicción que los modelos ($NSE < 0$).

Se puede apreciar que en cuanto al ajuste de la geometría del surco para la obtención de los factores de forma e hidráulicos, la gran variación de estos produjo una disminución considerable en las áreas de los surcos, los cuales presentan grandes efectos en cuanto a los análisis, pudiéndose decir que en este caso era necesario el ajuste de los datos para los surcos 1 y 3.

También queda en evidencia las variaciones que se producen en las fases de avance y receso al utilizar la Ecuación de infiltración de Kostiakov y de Kostiakov-Lewis, debido al F_0 . Siendo el caso más notorio el del surco 3.

6. CONCLUSIONES

Los resultados de este estudio permiten establecer que los parámetros hidráulicos de la forma de surco afectan en la obtención del área, ya que en la mayoría de los casos se presentó una disminución del área al momento de realizar el ajuste de la geometría del surco. Así como también se ven afectados los coeficientes de infiltración, provocando en algunos casos la imposibilidad de obtenerlos.

Al contar con parámetros hidráulicos de la forma de surco aceptables, se pueden apreciar mejoras en las fases de avance y receso utilizando el modelo cinemático Aquasurco, es por esto que se deben realizar mediciones precisas en cuanto a la geometría del surco, evitando imperfecciones.

El modelo Aquasurco presentó un comportamiento diverso debido a las múltiples variables presentes en éste, pero en gran parte de los casos analizados se encuentran correlaciones altas, entregando buenas estimaciones.

Tal como se vio en los análisis estadísticos que el modelo Aquasurco presenta estimaciones similares a los datos de terreno al igual que los modelos de simulación simple.

Finalmente se deja estipulado que el parámetro F_0 en el modelo cinemático Aquasurco presenta un efecto en la disminución de la curva de avance y un aumento en el modelo de avance simple. Siendo conveniente no incluir este

parámetro en el programa Aquasurco, ya que suele presentar inconvenientes al momento de utilizarlo.



7. LITERATURA CITADA

1. Al-Azawi, S.A. 1985. Experimental evaluation of infiltration models. *J. Hydrol.* 24(2): 77-88.
2. Becerra, A., H. Tafur. 2006. Programa computacional de simulación hidráulica del riego por surcos usando el modelo de onda cinemática (Parte I: Fundamento teórico). *Dyna* 73(149): 107-117.
3. Brown-Manrique, O., D. Luis-Pelier e Y. Gallardo-Ballat. 2019. Metodología para la estimación del caudal aplicado en el surco a partir de las ecuaciones de Chezy y Bazin [en línea]. *Rev. Cienc. Téc. Agropec.* 28(3).
<https://revistas.unah.edu.cu/index.php/rcta/article/view/1129/pdf_1>
. [Consulta: 10 agosto 2020].
4. Camacho, E., C. Pérez, J. Roldán y M. Alcaide. 1997. Modelo de manejo y control en tiempo real del riego por surcos. *Ing. Agua* 4(4): 11-18.
5. Chow, V.T. 1959. *Open-channel hydraulics*. McGraw-Hill International Book Company. New York, USA.
6. Delgado, W.G. 2015. Gestión y valor económico del recurso hídrico. *Rev. Finanz. Polít. Econ.* 7(2): 279-298.
7. Ebrahimian, H., A. Liaghat. 2011. Field evaluation of various mathematical models for furrow and border irrigation systems. *Soil Water Res.* 6(2): 91-101.

8. Elliott, R.L. 1980. Furrow irrigation field evaluation data. Summers 1977 to 1979. Colorado State University. Department of Agricultural and Chemical Engineering. Fort Collins, USA.
9. Elliott, R.L., W.R. Walker. 1982. Field evaluation of furrow infiltration and advance functions. *Trans. ASAE* 25(2): 396–400.
10. Esfandiari, M., B.L. Maheshwari. 1997. Application of the optimization method for estimating infiltration characteristics in furrow irrigation and its comparison with other methods. *Agric. Water Manag.* 34(2): 169-185.
11. Fernández de Córdova, C.J., A.J.F. León, Y. Rodríguez, P.G. Martínez y D.M. Meneses. 2018. Influencia del método de estimación en el coeficiente de Manning para cauces naturales. *Riha* 39(1): 17-31.
12. Gilley, J.E., S.C. Finkner. 1991. Hydraulic roughness coefficients as affected by random roughness. *Trans. ASAE* 34(3): 897-903.
13. Guerra, M.A. 2009. Manual de diseño de sistemas de riego a gravedad y por aspersión. Tesis, Ingeniero Civil. Universidad San Francisco de Quito, Colegio Politécnico. Quito, Ecuador.
14. Hoffman, G.J., R.G. Evans, M.E. Jensen, D.L. Martin and R.L. Elliott. 2007. *Design and operation of farm irrigation systems.* (2nd. ed.). American Society of Agricultural and Biological Engineers. St. Joseph, USA.
15. Holzapfel, E.A., M.A. Mariño and J. Chávez-Morales. 1984. Comparison and selection of furrow irrigation simulation models. *Agric. Water Manag.* 9(2): 105-125.

16. Holzapfel, E.A., M.A. Mariño, A. Valenzuela and F. Díaz. 1988. Comparison of infiltration measuring methods for surface irrigation. *J. Irrig. Drain. Eng.* 114(1): 130-142.
17. Holzapfel, E.A., J. Jara, C. Zuniga, M.A. Mariño, J. Paredes and M. Billib. 2004. Infiltration parameters for furrow irrigation. *Agric. Water Manag.* 68(1): 19-32.
18. Holzapfel, E.A., A. Pannunzio, I. Lorite, A.S. de Oliveira and I. Farkas. 2009. Design and management of irrigation systems. *Chilean J. Agric. Res.* 69(Suppl. 1): 17-25.
19. Holzapfel, E.A., C. Leiva, M.A. Mariño, J. Paredes, J.L. Arumí and M. Billib. 2010. Furrow irrigation management and design criteria using efficiency parameters and simulation models. *Chilean J. Agric. Res.* 70(2): 287-296.
20. Holzapfel, E.A. 2020a. Determinación de la fase de receso. Universidad de Concepción, Facultad de Ingeniería Agrícola, Centro de Recursos Hídricos para la Agricultura y la Minería. Chillán, Chile (Documento de clases, eholzapf@udec.cl).
21. Holzapfel, E.A. 2020b. Hidráulica de forma de surcos. Universidad de Concepción, Facultad de Ingeniería Agrícola, Centro de Recursos Hídricos para la Agricultura y la Minería. Chillán, Chile (Documento de clases, eholzapf@udec.cl).
22. Karmeli, D., L.J. Salazar and W.R. Walker. 1978. Assessing the spatial variability of irrigation water applications. *U.S. Environmental*

Protection. Office of Research and Development. Agency Robert S. Kerr Environmental Research Laboratory. Ada, USA.

23. Koech, R., M. Gillies and R. Smith. 2010. Simulation modelling in surface irrigation systems. In: Southern region engineering conference. November 11-12, 2010. University of Southern Queensland. Toowoomba, Australia.
24. Legates, D.R., G.J. McCabe. 1999. Evaluating the use of a “goodness-of-fit” measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water Resour. Res.* 35(1): 233– 241.
25. Lima, V.I., R. Pordeus, C.A. de Azevedo, J. Pereira, V.L. de Lima and M. R. Azevedo. 2014. Optimization of furrow irrigation systems with continuous flow using the software applied to surface irrigation simulations - SASI. *Afr. J. Agric. Res.* 9(42): 3115-3125.
26. Liu, K., X. Jiao, J. Li, Y. An, W. Guo, M.K. Salahou and H. Sang. 2020. Performance of a zero-inertia model for irrigation with rapidly varied inflow discharges. *Int. J. Agric. Biol. Eng.* 13(2): 175-181.
27. Maldonado, T. 2007. Unidad: diseño de métodos de riego superficial por gravedad. Texto guía. Universidad Nacional de Loja, Área Agropecuaria y de Recursos Naturales Renovables, Carrera de Ingeniería Agrícola. Loja, Ecuador.
28. Morábito, J.A. 2003. Desempeño del riego por superficie en el área de riego del río Mendoza. Eficiencia actual y potencial. Parámetros de riego y recomendaciones para un mejor aprovechamiento agrícola en

- un marco sustentable. Tesis, Magister Scientiae. Universidad Nacional de Cuyo. Instituto Nacional del Agua. INTA. Cuyo, Argentina.
29. Mostafazadhefard, B. 1982. Furrow geometry and roughness under surge and continuous flow. Thesis, Master of Science in Engineering (Agriculture and Irrigation Engineering). Utah State University. Logan, USA.
30. Pushpalatha, R., C. Perrin, N. Le Moine and V. Andréassian. 2012. A review of efficiency criteria suitable for evaluating low-flow simulations. *J. Hydrol.* 420-421(1): 171–182.
31. Ricciardi, C.A. 2006. Maximización de los índices que evalúan el riego por surcos con un modelo de simulación en lenguaje de programación MATLAB. Memoria de título, Ingeniero Civil Agrícola. Universidad de Concepción, Facultad de Ingeniería Agrícola. Chillán, Chile.
32. Rodríguez, J.A. 2007. Modelización de la fase de avance del riego por superficie. Integración de una solución de balance de volumen con redes neuronales artificiales. Memoria del período de investigación. Universidad de Sevilla, Departamento de Ciencias Agroforestales. Sevilla, España.
33. Schilardi, C. 2010. Desempeño del riego por superficie en el área de regadío de la cuenca del río Tunuyán superior, Mendoza. Maestría en Riego y Drenaje. Universidad Nacional de Cuyo. Instituto Nacional del Agua. INTA. Cuyo, Argentina.

34. Sepaskhah, A.R., H. Bondar. 2002. Estimation of Manning roughness coefficient for bare and vegetated furrow irrigation. *Biosyst. Eng.* 82(3): 351–357.
35. Walker, W.R., G.V. Skogerboe. 1987. *Surface irrigation: theory and practice*. Prentice Hall. Englewood Cliffs, USA.

