

# Tabla de Contenido

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Motivación . . . . .	1
1.2. Objetivos . . . . .	2
1.3. Estructura del documento . . . . .	3
<b>2. Estado del arte</b>	<b>4</b>
2.1. Estrategias convencionales . . . . .	4
2.2. Control con aprendizaje reforzado . . . . .	5
2.2.1. Aplicaciones de AR en la planificación de riego . . . . .	6
2.2.2. Variantes en la aplicación de AR . . . . .	6
2.3. Discusión . . . . .	8
<b>3. Antecedentes agrícolas</b>	<b>10</b>
3.1. Propiedades del suelo . . . . .	10
3.1.1. Textura y porosidad . . . . .	10
3.1.2. Humedad del suelo . . . . .	11
3.2. Ecuación de balance hídrico . . . . .	12
3.2.1. Evapotranspiración (ET) . . . . .	13
3.2.2. Escurrimiento Superficial (RO) . . . . .	17
3.2.3. Percolación Profunda (DP) . . . . .	17
3.2.4. Ascenso Capilar (CR) . . . . .	18
3.3. Características de la producción de uva de vino . . . . .	18

3.3.1.	Etapas de desarrollo del cultivo . . . . .	18
3.3.2.	Estrés hídrico . . . . .	19
3.3.3.	Rendimiento del cultivo . . . . .	20
3.3.4.	Potencial Hídrico Xilemático (Px) . . . . .	20
<b>4.</b>	<b>HYDRUS-1D</b>	<b>21</b>
4.1.	Configuración de HYDRUS-1D . . . . .	22
4.1.1.	Información básica . . . . .	22
4.1.2.	Flujo de agua ( <i>Water Flow</i> ) . . . . .	25
4.1.3.	Absorción de agua en las raíces ( <i>Root Water Uptake</i> ) . . . . .	29
4.1.4.	Condiciones atmosféricas ( <i>Variable Boundary Conditions</i> ) . . . . .	31
4.1.5.	Perfil de suelo inicial ( <i>Soil Profile</i> ) . . . . .	32
<b>5.</b>	<b>Aprendizaje Reforzado (AR)</b>	<b>35</b>
5.1.	Conceptos básicos . . . . .	35
5.1.1.	Proceso de decisión de Markov . . . . .	36
5.1.2.	Ecuación de Bellman y funciones de valor . . . . .	38
5.2.	Clasificación de algoritmos . . . . .	39
5.2.1.	<i>Model Free</i> . . . . .	39
5.2.2.	<i>Value Based - Policy Based</i> . . . . .	40
5.2.3.	Monte Carlo y <i>Temporal Difference</i> . . . . .	41
5.2.4.	<i>On-policy</i> y <i>Off-policy</i> . . . . .	41
5.3.	Algoritmos . . . . .	42
5.3.1.	<i>Deep Q-Network</i> <b>DQN</b> . . . . .	42
5.3.2.	<i>Twin Delayed Deep Deterministic Policy Gradient</i> <b>TD3</b> . . . . .	43
5.3.3.	<i>Proximal Policy Optimization</i> <b>PPO</b> . . . . .	45
<b>6.</b>	<b>Metodología</b>	<b>47</b>
6.1.	Construcción del modelo inicial . . . . .	48

6.1.1.	Antecedentes agrícolas para el desarrollo del cultivo . . . . .	48
6.1.2.	Implementación del sistema en HYDRUS-1D . . . . .	48
6.1.3.	Integración en Python utilizando la librería <i>Phydrus</i> . . . . .	48
6.2.	Ajuste del modelo . . . . .	49
6.2.1.	Ajuste del modelo para el riego de uva vinífera . . . . .	49
6.2.2.	Simulación <i>offline</i> de la primera etapa de riego . . . . .	49
6.3.	Aplicación de aprendizaje reforzado . . . . .	50
6.3.1.	Modelamiento de la segunda etapa de riego en un ambiente <i>Gym</i> . . . . .	50
6.3.2.	Sistemas de control para el riego . . . . .	50
6.3.3.	Configuración de algoritmos y entrenamiento del agente . . . . .	51
6.3.4.	Programaciones de riego generadas mediante AR . . . . .	51
6.4.	Resultados del experimento . . . . .	51
6.4.1.	Comparación con técnica de riego convencional . . . . .	52
6.4.2.	Análisis de resultados . . . . .	52
6.4.3.	Conclusiones . . . . .	52
<b>7.</b>	<b>Desarrollo de modelos y diseño de controladores</b>	<b>53</b>
7.1.	Construcción del modelo inicial . . . . .	53
7.1.1.	Antecedentes agrícolas para el desarrollo del cultivo . . . . .	54
7.1.2.	Implementación del sistema en HYDRUS-1D . . . . .	55
7.1.3.	Integración en Python utilizando la librería <i>Phydrus</i> . . . . .	56
7.2.	Ajuste del modelo . . . . .	58
7.2.1.	Ajuste del modelo para el riego de uva vinífera . . . . .	58
7.2.2.	Simulación <i>offline</i> de la primera etapa de riego . . . . .	60
7.3.	Aplicación de aprendizaje reforzado . . . . .	62
7.3.1.	Modelamiento de la segunda etapa de riego en un ambiente <i>Gym</i> . . . . .	63
7.3.2.	Definición de los sistemas de control para el riego . . . . .	64
7.3.3.	Configuración del agente . . . . .	66

7.3.4.	Programaciones de riego generadas mediante AR . . . . .	71
7.3.5.	Implementación de técnicas de riego convencional . . . . .	72
<b>8.</b>	<b>Estudio por simulación</b>	<b>74</b>
8.1.	Diseño y configuración del experimento . . . . .	74
8.1.1.	Configuración del modelo y primera etapa de desarrollo . . . . .	74
8.1.2.	Configuración del aprendizaje reforzado en la segunda etapa . . . . .	76
8.1.3.	Configuración del entrenamiento . . . . .	78
8.1.4.	Estrategias de riego convencional . . . . .	79
8.2.	Resultados del experimento . . . . .	79
8.2.1.	Simulación <i>Offline</i> de la primera etapa . . . . .	79
8.2.2.	Entrenamiento del sistema de control para la segunda etapa . . . . .	81
8.2.3.	Programaciones de riego con AR para el primer método . . . . .	85
8.2.4.	Programaciones de riego con AR para el segundo método . . . . .	88
8.2.5.	Programaciones de riego con estrategias convencionales para el primer método . . . . .	90
8.2.6.	Programaciones de riego con estrategias convencionales para el segundo método . . . . .	92
8.2.7.	Programaciones de riego aplicadas por la Viña . . . . .	94
8.3.	Análisis de resultados . . . . .	96
8.3.1.	Modelo de simulación . . . . .	96
8.3.2.	Sistema de control . . . . .	97
8.3.3.	Entrenamiento de los controladores . . . . .	98
8.3.4.	Resultados obtenidos . . . . .	100
8.3.5.	Comparación con estrategias convencionales . . . . .	101
8.3.6.	Comparación con riegos aplicados en la Viña . . . . .	102
<b>9.</b>	<b>Conclusión y trabajo futuros</b>	<b>103</b>
9.1.	Conclusiones . . . . .	103

9.2. Trabajo Futuro . . . . .	105
<b>Bibliografía</b>	<b>106</b>
<b>Anexos</b>	<b>110</b>
<b>Anexo A. Cálculo de las variables de la ecuación Penman-Monteith</b>	<b>110</b>
<b>Anexo B. Implementación de Phydrus</b>	<b>114</b>
B.1. HYDRUS-1D en Python . . . . .	114
B.1.1. Instalación de Phydrus . . . . .	114
B.1.2. Utilizando Phydrus . . . . .	115
<b>Anexo C. Algoritmos aprendizaje reforzado</b>	<b>117</b>
<b>Anexo D. Gym Environment</b>	<b>122</b>
<b>Anexo E. Otros resultados</b>	<b>124</b>
E.1. Comparación HYDRUS-1D y <i>Phydrus</i> . . . . .	124
E.2. Perfil de suelo en la primera etapa . . . . .	128
E.3. Acciones de riego y otras programaciones de riego . . . . .	130
E.4. Planificaciones de riego con estrategias convencionales . . . . .	134
E.4.1. Tablas de resumen para Método 1 . . . . .	134
E.4.2. Programaciones de riego para Método 1 . . . . .	136
E.4.3. Tablas de resumen para Método 2 . . . . .	139
E.4.4. Programaciones de riego para Método 2 . . . . .	140