

Tabla de Contenido

Índice de cuadros	iv
Índice de figuras	v
1. Introducción	1
1.1. Motivación	1
1.2. Objetivos	2
1.2.1. Objetivo general	2
1.2.2. Objetivos específicos	2
1.3. Metodología	2
2. Estado del arte	4
2.1. Programación del riego	4
2.1.1. Balance hídrico	4
2.1.2. Control PID	4
2.1.3. Control difuso	4
2.1.4. Control predictivo basado en modelos	5
2.1.5. Control con aprendizaje reforzado	5
2.1.6. Discusión	5
3. Sistema hidrogeológico	7
3.1. Profundidad del nivel de agua en un pozo	7
3.2. Recarga del acuífero y cota hídrica	9
3.3. Dinámica de los cultivos	9
3.3.1. Balance hídrico	9
3.3.2. Discusión	13
3.4. Rendimiento de los cultivos	13
4. Aprendizaje reforzado	15
4.1. Métodos por gradiente de la política	17
4.1.1. Estructura actor-crítico	17
4.2. Proximal Policy Optimization	17
4.3. Deep Deterministic Policy Gradient	19
4.4. Twin Delayed Deep Deterministic Policy Gradient	20
5. Modelo de la planta y sistema de control propuesto	21
5.1. Sistema agrícola-hidrogeológico	21
5.2. Datos meteorológicos	24
5.3. Modelo del sistema agrícola-hidrogeológico	25
5.4. Esquema de control	27
5.5. Aprendizaje reforzado	27

6. Resultados	30
6.1. Simulación sin pozos	31
6.1.1. Recompensas totales	31
6.1.2. Riegos totales	32
6.1.3. Rendimientos	34
6.1.4. Mejor método: PPO single con la recompensa 3	35
6.2. Simulación con pozos	39
6.2.1. Recompensas totales	39
6.2.2. Riegos totales	40
6.2.3. Rendimientos	42
6.2.4. PPO single con la recompensa 1 y $c_1 = 1$	44
6.3. Análisis general de resultados	48
7. Conclusiones	50
7.1. Trabajo futuro	51
Bibliografía	52
Anexos	55
A. Conceptos hidrogeológicos	56
B. Cálculo de variables de la ecuación FAO Penman-Monteith	57
C. Control predictivo basado en modelos	60
D. Optimización por enjambre de partículas	61
E. Entorno Gym	62
F. Riegos diarios por agricultor para los algoritmos con mejor desempeño	63
F.1. PPO single con recompensa 3 (modelo sin pozos)	63
F.1.1. $P_{scale} = 1$	63
F.1.2. $P_{scale} = 0$	66
F.2. PPO single con recompensa 1 y $c_1 = 1$ (modelo con pozos)	68
F.2.1. $P_{scale} = 1$	68
F.2.2. $P_{scale} = 0$	70