

# TABLA DE CONTENIDO

<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
1.1. Introducción.....	1
1.3. Objetivos específicos .....	2
1.4 Contenido del Informe.....	3
<b>2. Antecedentes de Estudio</b> .....	<b>4</b>
2.1 La Inteligencia Artificial .....	4
2.1.1 Machine Learning .....	5
2.1.2 Deep Learning .....	7
2.2 Computación Evolutiva .....	8
2.2.1 Algoritmos Genéticos.....	9
2.3 Gestión de las aguas subterráneas en Chile y el mundo utilizando diferentes criterios .....	17
2.3.1 Criterio Espacial (DGA,2019).....	18
2.3.2 Criterio Geoestadístico (DGA, 2019) .....	19
2.4 Aplicaciones de la IA en la gestión de las aguas subterráneas en el mundo 21	
2.5 Integrated approach for optimizing groundwater monitoring systems using evolutionary algorithms (Mahmod et al., 2021) .....	23
2.5.1 Algoritmo Genético (GA).....	23
2.5.2 Algoritmo Genético Modificado (MGA).....	26
2.5.3 Modelo de Combinación Progresiva (PC).....	30
2.5.4 Selección Optimizada .....	35
2.5.5 Diagramas de Flujo.....	35
2.5.6 Comparación de Resultados.....	36
<b>3. Metodología</b> .....	<b>37</b>
3.1 Alcances .....	37
3.2 Diseño del Programa Computacional.....	37
3.2.1 Diseño del <i>Input Data Function</i> (IDF).....	39
3.2.2 Diseño del <i>Main Algorithm</i> (MA) .....	41
3.2.3 Diseño del <i>Output Results Function</i> (ODF).....	54
3.3 Tiempo de Compilación .....	56
3.3.1 Número de Cromosomas.....	57

3.3.2	Número de Pozos .....	59
3.3.3	Cantidad de Data Temporal (# Tiempos).....	60
3.3.4	Número de Generaciones.....	61
3.3.5	Expresión Analítica General para el Tiempo de Compilación del Proceso FP .....	63
3.3.6	Factor de Corrección .....	63
3.3.7	Expresión Analítica General para el Tiempo de Compilación del PLWSP .....	65
3.3.8	Tiempo Compilación Versión Numpy.....	66
3.4	Valores Tipo Arange .....	69
3.5	Caso Simulado con Valores Sintéticos .....	69
3.6	Caso en Estudio, Salar de Atacama .....	71
3.6.1	Elección de Pozos .....	73
3.6.2	Negrillar .....	75
3.6.3	Tilopozo.....	77
<b>4.</b>	<b>Resultados .....</b>	<b>79</b>
4.1	Parámetros de Replicación .....	79
4.1.1	Probabilidad de Entrecruzamiento.....	79
4.1.2	Probabilidad de Mutación .....	81
4.1.3	Número de Generaciones y Cromosomas.....	85
4.2	Implementación de mejoras en el modelo genético .....	88
4.2.1	Caso Simulado con Valores Sintéticos .....	88
4.2.2	Caso en Estudio Salar de Atacama Negrillar.....	100
4.2.3	Resumen de Resultados.....	112
4.3	Tiempo de Compilación .....	114
4.3.1	Número de Cromosomas.....	114
4.3.2	Número de Pozos .....	115
4.3.3	Cantidad de Data Temporal (# Tiempos).....	117
4.3.4	Número de Generaciones.....	118
4.3.5	Expresión Analítica General para el Tiempo de Compilación del Proceso FP .....	119
4.3.6	Factor de Corrección .....	120
4.3.7	Expresión Analítica General para el Tiempo de Compilación del PLWSP .....	122

4.3.8 Tiempo Compilación Versión Numpy .....	125
4.4 Caso en Estudio, Salar de Atacama .....	127
4.4.1 Negrillar .....	127
4.4.2 Tilopozo .....	130
<b>5. Discusión .....</b>	<b>133</b>
5.1 Parámetros de Replicación .....	133
5.1.1 Probabilidad de Entrecruzamiento .....	133
5.1.2 Probabilidad de Mutación .....	133
5.1.3 Número de Generaciones y Cromosomas .....	134
5.2 Implementación de mejoras en el modelo genético .....	134
5.3 Tiempo de Compilación .....	137
5.3.1 Número de Cromosomas-Data Temporal-Generaciones-Número de Pozos.....	137
5.3.2 Factor de Corrección .....	138
5.3.3 Expresión Analítica General .....	138
5.3.3. Tiempo de Compilación Versión Numpy .....	139
5.4 Caso en Estudio, Salar de Atacama .....	139
5.4.1 Negrillar .....	139
5.4.2 Tilopozo .....	139
5.4.3 Comentarios Generales .....	140
<b>6. Conclusiones y Recomendaciones .....</b>	<b>141</b>
6.1 Conclusiones.....	141
6.2 Recomendaciones .....	142
<b>7. BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>143</b>
<b>Anexos    148</b>	
Anexo A. ....	149
Anexo B. ....	154
Anexo B.1 .....	155
Anexo B.2 .....	194
Anexo C. ....	208
Anexo C.1 .....	209
Anexo C.2 .....	254
Anexo C.3.....	259

Anexo C.4 .....	265
Anexo C.5 .....	271
Anexo C.6 .....	276
Anexo C.7 .....	319
Anexo D. ....	353
Anexo D.1 .....	354
Anexo D.2 .....	372
Anexo E. ....	400
Anexo F.....	402
Anexo F.1 .....	403
Anexo F.1 .....	405

## INDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Ramas de la IA (Regona et al., 2022). ....	5
Figura 2.2 Adaptación de las fórmulas para la cuantificación del rendimiento (Bartneck et al., 2020).....	6
Figura 2.3 Modelo básico de ANN (Hai Tao et.al, 2022). ....	8
Figura 2.4 Esquema general de los algoritmos evolutivos (Eiben y Smith, 2015).        9	9
Figura 2.5 Descripción gráfica de los parámetros básicos en un algoritmo genético (Abdalfattah, 2020). ....	10
Figura 2.6 Representación gráfica del proceso de mutación (Abdalfattah, 2020).        13	13
Figura 2.7 Representación gráfica del proceso de entrecruzamiento (Abdalfattah, 2020).....	14
Figura 2.8 Diagrama de flujo general de un algoritmo genético. ....	15
Figura 2.9 Resultados estadísticos utilizando diferentes cantidades de pozos representativos (Briceño-Ruiz et.al, 2011). ....	20
Figura 2.10 Representación cartográfica de la utilización de IA en la modelación de niveles estáticos (Hai Tao et.al, 2022). ....	22
Figura 2.11 Conceptualización aritmética del crecimiento observado de artículos de investigación que utilizan IA para la modelación de niveles estáticos durante el periodo 2008-2020 (Hai Tao et.al, 2022). ....	22
Figura 2.12 Matriz de Selección (Mahmod et al.,2021).....	29
Figura 2.13 Matriz de Frecuencia.....	31

Figura 2.14	Matriz Fitness (Mahmod et al.,2021).....	34
Figura 2.15	Diagramas de flujo: (a) Genetic Algorithm; (b) Modified Genetic Algorithm; (c) Progressive Combination (Mahmod et al.,2021).....	35
Figura 2.16	Contraste de resultados utilizando LWS (a) y CLWS (b) para el pozo OW24 (Mahmod et al.,2021). ....	36
Figura 2.17	Contraste de resultados utilizando LWS (a) y CLWS (b) para el pozo OW33 (Mahmod et al.,2021). ....	36
Figura 3.1	Diagrama de funciones generales.....	38
Figura 3.2	Diagrama de funciones IDF.....	40
Figura 3.3	Diagrama de funciones MA. ....	42
Figura 3.4	Representación gráfica de la deducción de las ecuaciones del Rotation Process.....	52
Figura 3.5	Diagrama de funciones ODF.....	55
Figura 3.6	Mapa de la zona de estudio. ....	72
Figura 3.7	Representación gráfica de los parámetros mencionados. Adaptado de Williams (1985). ....	74
Figura 3.8	Mapa del sector de Negrillar.....	76
Figura 3.9	Mapa del sector de Tilopozo. ....	78
Figura 4.1	Resultado gráfico para simulaciones con probabilidad de entrecruzamiento del 20%. ....	79
Figura 4.2	Resultado gráfico para simulaciones con probabilidad de entrecruzamiento del 60%. ....	80
Figura 4.3	Resultado gráfico para simulaciones con probabilidad de entrecruzamiento del 85%. ....	80
Figura 4.4	Resultado gráfico para simulaciones con probabilidad de entrecruzamiento del 100%. ....	81
Figura 4.5	Resultado gráfico para simulaciones con data temporal de 5 pozos. 82	
Figura 4.6	Resultado gráfico para simulaciones con data temporal de 20 pozos. 82	
Figura 4.7	Resultado gráfico para simulaciones con data temporal de 100 pozos. 83	
Figura 4.8	Resultado gráfico para simulaciones con data temporal de 200 pozos. 83	
Figura 4.9	Resultado gráfico para simulaciones con data temporal sintética de 12 pozos. 84	

Figura 4.10	Resultado gráfico para simulaciones con data temporal sintética de 24 pozos.	85
Figura 4.11	RMSE vs Número de generaciones para una data temporal de 5 pozos.	85
Figura 4.12	RMSE vs Número de generaciones para una data temporal de 20 pozos.	86
Figura 4.13	RMSE vs Número de generaciones para una data temporal de 50 pozos.	86
Figura 4.14	RMSE vs Número de generaciones para una data temporal de 100 pozos.	87
Figura 4.15	RMSE vs Número de generaciones para una data temporal de 200 pozos.	87
Figura 4.16	Comparación de las diferentes curvas obtenidas con el modelo de Mahmud et al. (2021) asociado a data sintética para el pozo OWT-4.....	88
Figura 4.17	Comparación de las diferentes curvas obtenidas con el modelo de Mahmud et al. (2021) asociado a data sintética para el pozo OWT-11.....	89
Figura 4.18	Comparación de las diferentes curvas obtenidas con el modelo de Mahmud et al. (2021) asociado a data sintética para el pozo OWT-23.....	89
Figura 4.19	FIM para el caso del modelo de Mahmud et al. (2021) asociado a data sintética.	90
Figura 4.20	Comparación de las diferentes curvas obtenidas con el modelo que incorpora la implementación Constant Addition asociado a data sintética para el pozo OWT-4.	91
Figura 4.21	Comparación de las diferentes curvas obtenidas con el modelo que incorpora la implementación Constant Addition asociado a data sintética para el pozo OWT-11.....	92
Figura 4.22	Comparación de las diferentes curvas obtenidas con el modelo que incorpora la implementación Constant Addition asociado a data sintética para el pozo OWT-23.....	92
Figura 4.23	FIM para el caso del modelo que incorpora la implementación Constant Addition asociado a data sintética. ....	93
Figura 4.24	Comparación de las diferentes curvas obtenidas con el modelo que incorpora la implementación Random Index Position asociado a data sintética para el pozo OWT-4.....	94
Figura 4.25	Comparación de las diferentes curvas obtenidas con el modelo que incorpora la implementación Random Index Position asociado a data sintética para el pozo OWT-11.....	95

Figura 4.26	Comparación de las diferentes curvas obtenidas con el modelo que incorpora la implementación Random Index Position asociado a data sintética para el pozo OWT-23.....	95
Figura 4.27	FIM para el caso del modelo que incorpora la implementación Random Index Position asociado a data sintética.....	96
Figura 4.28	Comparación de las diferentes curvas obtenidas con el modelo que incorpora la implementación Rotation Process asociado a data sintética para el pozo OWT-4.	97
Figura 4.29	Comparación de las diferentes curvas obtenidas con el modelo que incorpora la implementación Rotation Process asociado a data sintética para el pozo OWT-11.....	98
Figura 4.30	Comparación de las diferentes curvas obtenidas con el modelo que incorpora la implementación Rotation Process asociado a data sintética para el pozo OWT-23.....	98
Figura 4.31	FIM para el caso del modelo que Incorpora la Implementación Rotation Process asociado a data sintética. ....	99
Figura 4.32	Comparación de las diferentes curvas obtenidas con el modelo de mahmod et al. (2021) asociado a Negrillar para el pozo NEP-3. ....	101
Figura 4.33	Comparación de las diferentes curvas obtenidas con el modelo de mahmod et al. (2021) asociado a Negrillar para el pozo NEP-3. ....	101
Figura 4.34	FIM para el caso del modelo de Mahmud et al. (2021) asociado a Negrillar.	102
Figura 4.35	Comparación de las diferentes curvas obtenidas con el modelo que incorpora la implementación Constant Addition asociado a Negrillar para el pozo NEP-3.	103
Figura 4.36	Comparación de las diferentes curvas obtenidas con el modelo que incorpora la implementación Constant Addition asociado a Negrillar para el pozo NEP-9.	104
Figura 4.37	FIM para el caso del modelo que incorpora la implementación Constant Addition asociado a Negrillar. ....	105
Figura 4.38	Comparación de las diferentes curvas obtenidas con el modelo que incorpora la implementación Random Index Position asociado a Negrillar para el pozo NEP-3.	106
Figura 4.39	Comparación de las diferentes curvas obtenidas con el modelo que incorpora la implementación Random Index Position asociado a Negrillar para el pozo NEP-9.	107
Figura 4.40	FIM para el caso del modelo que incorpora la implementación Random Index Position asociado a Negrillar. ....	108

Figura 4.41	Comparación de las diferentes curvas obtenidas con el modelo que incorpora la implementación Rotation Process asociado a Negrillar para el pozo NEP-3.	109
Figura 4.42	Comparación de las diferentes curvas obtenidas con el modelo que incorpora la implementación Rotation Process asociado a Negrillar para el pozo NEP-9.	110
Figura 4.43	FIM para el caso del modelo que incorpora la implementación Rotation Process asociado a Negrillar. ....	111
Figura 4.44	Relación temporal del número de cromosomas. ....	114
Figura 4.45	Relación temporal del número de pozos. ....	116
Figura 4.46	Relación temporal de la cantidad de data temporal. ....	117
Figura 4.47	Relación temporal del número de generaciones. ....	118
Figura 4.48	Relación entre la razón de tiempos de ejecución y la cantidad de data temporal. ....	121
Figura 4.49	Relación entre la razón de tiempos de ejecución de los procesos PLWSP y FP y el número de pozos. ....	122
Figura 4.50	Relación entre los tiempos de ejecución teóricos y empíricos. .	125
Figura 4.51	Relación entre la razón de tiempos de ejecución entre Numba y Numpy y el número de pozos de entrada en el modelo. ....	126
Figura 4.52	Resultado gráfico de la FIM para la data de pozos del sector de Negrillar.	129
Figura 4.53	Resultado gráfico de la FIM para la data de pozos del sector de Tilopozo.	132