

ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE TABLAS	5
ÍNDICE DE FIGURAS	7
RESUMEN	11
ABSTRACT	13
1. INTRODUCCIÓN	14
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	16
2.1. Evapotranspiración, Radiación Neta y balance de energía	16
2.2. Radiación Neta	17
2.3. Redes Neuronales Artificiales	22
2.4. Neuronas Biológicas y Artificiales	24
2.5. El aprendizaje en Redes Neuronales Artificiales	26
2.6. Ventajas de las ANN	28
2.7. El Perceptrón Multicapa	29
2.8. Algoritmo de entrenamiento “backpropagation” (retropropagación)	32
2.9. Mean Squared Error	35
2.10. Algoritmo Levenberg-Marquardt	35
3. MATERIALES Y MÉTODOS	37
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	44
5. CONCLUSIONES	66
6. BIBLIOGRAFÍA CITADA	68
7. ANEXOS	75

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Variables y sensores de la estación meteorológica automática.	38
Tabla 2. Resumen climático para los grupos de datos de entrenamiento.	44
Tabla 3. Resultado del entrenamiento de las 10 mejores ANN del grupo de 2645 con los datos del grupo A (Temporada Agrícola 2006-07).	45
Tabla 4. Resultado del entrenamiento de las 10 mejores ANN del grupo de 2645 con los datos del grupo B (Temporada Agrícola 2007-08).	47
Tabla 5. Resultado del entrenamiento de las 10 mejores ANN del grupo de 2645 con los datos del grupo C (Temporada Agrícola 2006-07 y 2007-08).	48
Tabla 6. Estadísticos obtenidos para cada ANN entrenada con el Grupo de Datos A después de la simulación con el Grupo de Datos V de validación. Destacada horizontalmente se muestra la ANN con la mejor estimación de Rn.	53
Tabla 7. Estadísticos obtenidos para cada ANN entrenada con el Grupo de Datos B después de la simulación con el Grupo de Datos V de validación. Destacada horizontalmente se muestra la ANN con la mejor estimación de Rn.	54
Tabla 8. Estadísticos obtenidos para cada ANN entrenada con el Grupo de Datos C después de la simulación con el Grupo de Datos V de validación. Destacada horizontalmente se muestra la ANN con la mejor estimación de Rn.	55

Tabla 9. Análisis estadístico para el flujo de radiación neta diario para las ANN con mejores puntajes en cada grupo de entrenamiento. El subíndice d señala una simulación para días despejados y el n para días con nubosidad. MAE = error absoluto medio; RMSE = cuadrado del error medio; V = hipótesis nula ($b=1$); F = hipótesis alternativa ($b\neq 1$);

ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 1. Componentes de la radiación (Autoría propia, referencia de Allen et al., 1998). 22
- Figura 2. Estructura de una Neurona biológica (Tomada de Wikimedia Commons, bajo dominio público de los Estados Unidos). 24
- Figura 3. Estructura de una ANN con dos capas ocultas. x_i = valor de entrada; w_{id} = valor del peso entre la entrada i y la unidad de proceso d ; y_{jd} = unidad de proceso d de la capa j ; y_1 = valor de salida de la red. (Autoría propia). 26
- Figura 4. Estructura de una unidad de cálculo de la ANN. x_{id} = valor de entrada d de la capa i ; w_{ijd} = peso d de la capa i hacia la capa j ; Σ = sumatoria de activación; $\phi_{ij}()$ = función de activación; y_{ij} = salida de la unidad de cálculo. (Autoría propia). 31
- Figura 5. Esquema de la agrupación de los datos y su reorganización (Proceso de Validación Cruzada) (Autoría propia). 40
- Figura 6. Esquema de selección de las ANN para cualquiera de los tres grupos de datos (Autoría propia). 41
- Figura 7. Comparación de grupos de datos A y B. Todos los gráficos muestran en el eje x la hora en un periodo de 24 horas. Los datos para cada día están sobre puestos. Para la radiación neta y radiación solar se utilizó una línea de tendencia polinómica de grado 5, para la temperatura y humedad relativa se utilizó una línea de tendencia polinómica de grado 3. 50

Figura 8. Esquema simplificado del modelo principal de estimación de Rn con redes neuronales artificiales. 51

Figura 9. Comparación entre los flujos de Radiación Neta Observada (Rno) y Estimada (Rne) para un viñedo cv. Cabernet Sauvignon durante la temporada agrícola 2008-2009 para días despejados (a) y para días con nubosidad (b) para la simulación realizada con la ANN A3 y el Grupo de Datos V. La línea gris muestra la curva $y = x$. 57

Figura 10. Comparación entre los flujos de Radiación Neta Observada (Rno) y Estimada (Rne) para un viñedo cv. Cabernet Sauvignon durante la temporada agrícola 2008-2009 para días despejados (a) y para días con nubosidad (b) para la simulación realizada con la ANN B2 y el Grupo de Datos V. La línea gris muestra la curva $y = x$. 58

Figura 11. Comparación entre los flujos de Radiación Neta Observada (Rno) y Estimada (Rne) para un viñedo cv. Cabernet Sauvignon durante la temporada agrícola 2008-2009 para días despejados (a) y para días con nubosidad (b) para la simulación realizada con la ANN C4 y el Grupo de Datos V. La línea gris muestra la curva $y = x$. 58

Figura 12. Variación de los flujos de Radiación Neta Observada (Rno) y Estimada (Rne) para un viñedo cv. Cabernet Sauvignon durante la temporada agrícola 2008-2009 para uno de los días despejados con mejor estimación (a) y para uno de los días con nubosidad (b) para la simulación realizada con la ANN A3 y el Grupo de Datos V. La radiación solar incidente (Rsi) fue incluida como referencia. 60

Figura 13. Variación de los flujos de Radiación Neta Observada (Rno) y Estimada (Rne) para un viñedo cv. Cabernet Sauvignon durante la temporada agrícola 2008-2009 para uno de los días despejados con peor estimación (a) y para uno de los días con nubosidad (b) para la simulación realizada con la ANN A3 y el Grupo de Datos V. La radiación solar incidente (Rsi) fue incluida como referencia. 61

Figura 14. Variación de los flujos de Radiación Neta Observada (Rno) y Estimada (Rne) para un viñedo cv. Cabernet Sauvignon durante la temporada agrícola 2008-2009 para uno de los días despejados con mejor estimación (a) y para uno de los días con nubosidad (b) para la simulación realizada con la ANN B2 y el Grupo de Datos V. La radiación solar incidente (Rsi) fue incluida como referencia. 61

Figura 15. Variación de los flujos de Radiación Neta Observada (Rno) y Estimada (Rne) para un viñedo cv. Cabernet Sauvignon durante la temporada agrícola 2008-2009 para uno de los días despejados con peor estimación (a) y para uno de los días con nubosidad (b) para la simulación realizada con la ANN B2 y el Grupo de Datos V. La radiación solar incidente (Rsi) fue incluida como referencia. 62

Figura 16. Variación de los flujos de Radiación Neta Observada (Rno) y Estimada (Rne) para un viñedo cv. Cabernet Sauvignon durante la temporada agrícola 2008-2009 para uno de los días despejados con mejor estimación (a) y para uno de los días con nubosidad (b) para la simulación realizada con la ANN C4 y el Grupo de Datos V. La radiación solar incidente (Rsi) fue incluida como referencia. 62

Figura 17. Variación de los flujos de Radiación Neta Observada (Rno) y Estimada (Rne) para un viñedo cv. Cabernet Sauvignon durante la temporada agrícola 2008-2009 para uno de los días despejados con peor estimación (a) y para uno de los días con nubosidad (b) para la simulación realizada con la ANN C4 y el Grupo de Datos V. La radiación solar incidente (Rsi) fue incluida como referencia. 63

Figura 18. Valores de albedo para los días de la temporada 2008-2009 calculado a partir de los valores de Rsi, Rno y Rne para la ANN A3 en días despejados. α_e = albedo con Rne; α_o = albedo con Rno. 64

Figura 19. (a) Fotografía aérea de una espaldera en el día Juliano 290. (b) Fotografía aérea de una espaldera en el día Juliano 310. 65