

Índice general

PRÓLOGO

XIII

1. Análisis climatológico para el departamento de Caldas	1
1.1. Introducción	2
1.1.1. Clima y tiempo atmosférico	2
1.1.2. Sistema climático	3
1.1.3. Variables climáticas	3
1.1.4. Variabilidad climática natural	4
1.2. Clima y variabilidad climática en Colombia	4
1.2.1. Variabilidad climática interdecadal	5
1.2.2. Variabilidad climática interanual	6
1.2.3. Variabilidad climática estacional	7
1.2.4. Variabilidad climática intraestacional	8
1.2.5. Ciclo diurno	8
1.3. Caracterización de la zona de estudio	9
1.4. Análisis de las variables climáticas de caldas	11
1.4.1. Brillo solar	12
1.4.2. Radiación solar	14
1.4.3. Temperatura	17
1.4.4. Humedad relativa	24
1.4.5. Precipitación	26
1.4.6. Velocidad y dirección del viento	30
1.5. Clasificación climática	35

1.6. Conclusiones	37
2. Predicción de caudales	45
2.1. Introducción	46
2.1.1. Hipótesis básicas en la modelación hidrológica	47
2.1.2. Las RNA en hidrología	47
2.1.3. Planteamiento general	48
2.2. Caso de estudio, cuenca del río Risaralda	49
2.3. Descripción de herramientas	51
2.3.1. Modelo hidrológico TETIS	51
2.3.2. Redes neuronales artificiales (RNA)	52
2.3.3. NSGA-II	55
2.4. Protocolo de experimentación	56
2.4.1. Sistema de información de variables de entrada	56
2.4.2. Modelo base de predicción	56
2.4.2.1. Definición de los subconjuntos de entrenamiento y prueba	57
2.4.2.2. Pre y post-procesamiento	59
2.4.2.3. Arquitectura de la RNA	59
2.4.3. Definición del espacio de entrada con NSGA-II	60
2.4.3.1. Fase I: Evaluación del número de entradas	60
2.4.3.2. Fase II: Evaluación de la selección final de entradas	60
2.4.3.3. Elementos comunes en la configuración del AE en ambas fases	61
2.5. Resultados y análisis	62
2.5.1. Fase I: Evaluación del número de entradas	62
2.5.2. Fase II: Evaluación de la selección final de entradas	65
2.6. Conclusiones	66
3. Análisis de Datos de Calidad del Aire en la Ciudad de Manizales Utilizando Matlab y Openair	73
3.1. Resumen	73
3.2. Introducción	74
3.3. Generalidades	75

3.3.1.	El PM_{10} y sus efectos en la salud	75
3.3.2.	Meteorología y su influencia en el estudio de la calidad del aire	77
3.3.3.	Herramientas para análisis de datos de calidad del aire	78
3.3.4.	R y Openair.	78
3.3.5.	MATLAB	81
3.4.	Metodología	84
3.4.1.	Conformación de las bases de datos	85
3.4.2.	Metodología para análisis con Openair	86
3.4.3.	Metodología para análisis con MATLAB	87
3.5.	Resultados y Análisis	88
3.5.1.	Estudio de variaciones temporales de PM_{10} y la influencia de variables meteorológicas utilizando Openair	88
3.5.1.1.	Distribución de vientos para periodos diurno, nocturno y predominancia para registros de 24h (día completo). Uso de la herramienta windRose para la elaboración de la rosa de vientos.	88
3.5.1.2.	Resumen de estadísticos principales en las estaciones de monitoreo para el periodo 2010 - 2012 utilizando el gráfico de cajas y la función aqStats	90
3.5.1.3.	Variación diaria, media mensual y semanal de PM_{10} en las estaciones de monitoreo durante 2010-2012	92
3.5.1.4.	La rosa de contaminantes y su utilidad en el análisis de la influencia de variables meteorológicas individuales	93
3.5.2.	Análisis de PM_{10} y su correlación con las variables meteorológicas mediante la implementación de MATLAB	97
3.5.2.1.	Técnica de visualización de datos empleando gráficas de dos y tres variables	98
3.5.2.2.	Aplicación de regresiones lineales a los datos de PM_{10} respecto a las variables meteorológicas (Técnica de regresión)	102
3.5.2.3.	Aplicación del Análisis de Componentes Principales - PCA (Técnica de reducción de datos y proyección)	103
3.6.	Conclusiones	108
4.	Análisis multidimensional de datos ambientales	115
4.1.	Introducción	116
4.2.	Almacenamiento y análisis de datos hidroclimatológicos	117
4.2.1.	Diseño de la bodega de datos	117

4.2.2.	Datos disponibles desde las estaciones hidroclimatológicas	117
4.2.3.	Modelo multidimensional - bodegas de datos	118
4.3.	Proceso KDD para estaciones hidroclimatológicas	119
4.3.1.	Proceso ETL	120
4.3.2.	Herramientas OLAP para datos hidroclimatológicos	121
4.4.	Sistema MADE - Multidimensional Analysis of Data Environmental	121
4.4.1.	Bodega de datos Made-DWH	122
4.4.2.	Herramienta para OLAP - Made-OLAP	122
4.5.	Análisis Multidimensional de datos hidroclimatológicos de Caldas	122
4.6.	Conclusiones y trabajos futuros	129

Índice de figuras

1.1. Localización del departamento de Caldas. Fuente: propia	9
1.2. Modelo de Elevación Digital del Terreno. Fuente: Adaptado (USGS)	9
1.3. Mapa de pendientes. Fuente: Adaptado (USGS)	10
1.4. Distritos o Provincias del departamento de Caldas. Fuente: Adaptado (IGAC) . .	10
1.5. Cuencas hidrográficas del departamento de Caldas. Fuente: propia	11
1.6. Comportamiento estacional del brillo solar mensual 1981-2010. Fuente: propia . .	13
1.7. Mapa de brillo solar diario 1981-2010. Fuente: propia	13
1.8. Mapa de brillo solar anual 1981-2010. Fuente: propia	14
1.9. Variación Interdecadal del brillo solar diario- Estación Agronomía 1981-2010. Fuente: propia	14
1.10. Ciclo diario de la radiación solar en la estación Posgrados 2002-2010. Fuente: propia	15
1.11. Comportamiento de la radiación en la estación Posgrados 2002-2010. Fuente: propia	16
1.12. Comportamiento estacional de la radiación 1981-2010. Fuente: propia	16
1.13. Mapa de radiación solar 1981-2010. Fuente: propia	17
1.14. Comportamiento Interdecadal de la radiación solar Estación Cenicafé 1981-2010. Fuente: propia	17
1.15. Ciclo diario de la Temperatura Media Estación Posgrados 2002-2010. Fuente: propia	20
1.16. Comportamiento estacional Temperatura Media 1981-2010. Fuente: propia	20
1.17. Mapa de Temperatura Media 1981-2010. Fuente: propia	21
1.18. Mapa de Temperatura Máxima 1981-2010. Fuente: propia	22
1.19. Mapa de Temperatura Mínima 1981-2010. Fuente: propia	22
1.20. Mapa de Temperatura Amplitud o Rango de Temperatura 1981-2010. Fuente: propia	23

1.21. Comportamiento Interdecadal de la Temperatura Media Estación Agronomía. Fuente: propia	23
1.22. Ciclo diurno de la humedad relativa estación Posgrados 2002-2010. Fuente: propia	24
1.23. Comportamiento estacional de la humedad relativa 1981-2010. Fuente: propia . .	25
1.24. Mapa humedad relativa media anual 1981-2010. Fuente: propia	25
1.25. Comportamiento interdecadal de la humedad relativa estación CENICAFÉ. Fuen- te: propia	26
1.26. Comportamiento del ciclo diurno de la precipitación estación Posgrados 2002- 2010. Fuente: propia	28
1.27. Comportamiento estacional de la precipitación media 1981-2010. Fuente: propia .	29
1.28. Mapa de precipitación media anual 1981-2010. Fuente: propia	29
1.29. Ciclo diurno de la velocidad media del viento estación Posgrados 2002-2010. Fuen- te: propia	33
1.30. Comportamiento de estacional de la velocidad del viento. Fuente: propia	34
1.31. Comportamiento de estacional de la velocidad del viento estación El Cisne Parque Nacional Natural Los Nevados. Fuente: propia	34
1.32. Comportamiento de la velocidad y dirección del viento.	35
1.33. Pisos térmicos en el departamento de Caldas 1981-2010. Fuente: propia	36
1.34. Clasificación climática de Lang departamento de Caldas 1981-2010. Fuente: propia	37
1.35. Clasificación climática de Lang-Caldas departamento de Caldas 1981-2010. Fuen- te: propia	37
2.1. Ciclo de vida de una adopción tecnológica.	48
2.2. Zona de estudio. Fuente: propia.	49
2.3. Precipitación media anual modelada. Fuente: propia.	50
2.4. Modelo hidrológico TETIS. Fuente: [Vélez et al., 2009]	52
2.5. Problema de generalización. Fuente: propia.	54
2.6. Frente de Pareto. Fuente: propia.	55
2.7. Observaciones y simulación hidrológica en el periodo de estudio.	58
2.8. Relación entre el número de entradas y el MSE. Fuente: propia.	63
2.9. Predicción con 50 RNA y esquema de 8 entradas. Fuente: propia.	64
2.10. Evaluación multi-objetivo de la selección de entradas. Fuente: propia.	65
2.11. Hidrogramas observados y predichos según el esquema de selección final de variables.	66

3.1. Esquema de gráfico de cajas elaborado en Openair (Tomado de [Follos, 2012]).	81
3.2. Distribución de vientos para periodo diurno (daylight) y nocturno (nighttime) en las estaciones Palogrande y Nubia durante 2010 - 2012. (a) Palogrande y (b) Nubia.	89
3.3. Distribución de vientos para periodo diario (24 h) en las estaciones de monitoreo durante 2010 - 2012. (a) Palogrande. (b) Nubia. (c) Liceo.	90
3.4. Distribución de concentraciones de PM_{10} para tres estaciones de monitoreo en la ciudad de Manizales durante 2010 - 2012.	91
3.5. Distribución diaria del PM_{10} en la ciudad de Manizales para las estaciones Palogrande (P), Nubia (N) y Liceo (L) durante 2010 - 2012. Las sombras representan los rangos de dispersión asociados a las líneas de tendencia calculada para cada estación.	92
3.6. Variación media mensual y concentración media por días de la semana del PM_{10} en la ciudad de Manizales para las estaciones Palogrande (P), Nubia (N) y Liceo (L) durante 2010 - 2012. Las sombras representan los rangos de valores para el cálculo de cada promedio (mensual o por días de la semana).	93
3.7. Porcentaje de contribución proporcional a la media del contaminante PM_{10} en función de la velocidad y dirección del viento para diferentes intervalos de precipitación en a) Liceo, b) Palogrande y c) Nubia.	95
3.8. Porcentaje de contribución proporcional a la media del contaminante PM_{10} en función de la velocidad y dirección del viento para diferentes intervalos de humedad relativa en a) Liceo, b) Palogrande y c) Nubia.	96
3.9. Porcentaje de contribución proporcional a la media del contaminante PM_{10} en función de la velocidad y dirección del viento para diferentes intervalos de temperatura en a) Liceo, b) Palogrande y c) Nubia.	97
3.10. Gráficas que relacionan el nivel de PM_{10} con una variable meteorológica para las tres estaciones: a), c) y e) PM_{10} respecto a la Precipitación Total; b), d) y f) PM_{10} respecto al Porcentaje de Humedad Relativa. La escala de color hace referencia a los niveles de concentración de PM_{10} : El color rojo indica mayor valor de concentración y el color azul indica menor valor de concentración.	99
3.11. Gráficas que relacionan el nivel de PM_{10} con dos variables meteorológicas para las tres estaciones: a), c) y e) Relación del PM_{10} respecto a la Radiación Solar y la Velocidad del Viento; b), d) y f) Relación del PM_{10} respecto a la Precipitación y el Porcentaje de Humedad Relativa. Escala de color hace referencia a los niveles de concentración de PM_{10} : El color rojo indica mayor valor de concentración y el color azul indica menor valor de concentración.	101
3.12. Esquema conceptual de la estabilidad atmosférica en Manizales	102
3.13. Gráficas Scree para las tres estaciones de monitoreo	105
3.14. Proyección de los datos en dos y tres componentes principales de las tres estaciones de monitoreo por clases. a) y b) Estación Liceo; Clase 1: Concentraciones mayores de $52 \mu\text{g}/\text{m}^3$, Clase 2: Concentraciones entre 35 y $52 \mu\text{g}/\text{m}^3$, Clase 3: Concentraciones menores a $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$. c) y d) Estación Nubia; Clase 1: Concentraciones mayores de $39 \mu\text{g}/\text{m}^3$, Clase 2: Concentraciones entre 25 y $39 \mu\text{g}/\text{m}^3$, Clase 3: Concentraciones menores a $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$. e) y f) Estación Palogrande; Clase 1: Concentraciones mayores de $34 \mu\text{g}/\text{m}^3$, Clase 2: Concentraciones entre 22 y $34 \mu\text{g}/\text{m}^3$, Clase 3: Concentraciones menores a $22 \mu\text{g}/\text{m}^3$	106

- 4.1. Diseño de la Bodega de Datos - Modelo Estrella. Fuente: propia. 119
- 4.2. Fases de KDD con un modelo multidimensional de bodega de datos. [Zubcoff(2009)]120
- 4.3. Sistema **MADÉ** - Multidimensional Analysis of Data Environmental. Fuente:
propia. 121
- 4.4. Interfaz de consulta en la herramienta MADE-OLAP. Fuente: propia. 122
- 4.5. Relación entre flujo y nivel medio en tres estaciones. Fuente: propia. 123
- 4.6. Relación entre Flujo y Nivel medio para 15 lustros. Fuente: propia. 124
- 4.7. Radiación solar - Presión barométrica estación posgrados. Fecha: 01/01/2010 In-
tervalo: 5 Minutos. Fuente: propia. 124
- 4.8. Lluvia acumulada en año/mes para diferentes estaciones. Fuente: propia. 125
- 4.9. Promedio de lluvias en el periodo de los fenómenos de *El niño* y *La niña*. Fuente:
propia. 125
- 4.10. Lluvias acumuladas para el periodo 1956-1961. Fuente: propia. 126
- 4.11. Diferentes escalas y variables para análisis. Fuente: propia. 126
- 4.12. Tendencia para la estación Cenicafé. Fuente: propia. 127
- 4.13. Climograma para la estación Java 1999-2010. Fuente: propia. 127
- 4.14. Datos faltantes en la medida brillo para la estación Agronomía en un período de
tiempo. Fuente: propia. 128
- 4.15. Climograma de la estación Santagueda. Fuente: propia. 128
- 4.16. Medidas almacenadas de la estación La Argentina - Ausencia de datos. Fuente:
propia. 129

Índice de tablas

1.1. Zonas de Vida del departamento de Caldas. Fuente: [CORPOCALDAS, 2007] . . .	12
1.2. Localización geográfica de estaciones climáticas con registros de brillo solar. Fuente: propia	12
1.3. Localización geográfica de estaciones climáticas con registros de radiación solar. Fuente: propia	15
1.4. Localización geográfica de estaciones climáticas con registros de temperatura. Fuente: propia	19
1.5. Significancia estadística análisis de varianza precipitación interdecadal. Fuente: propia	30
1.6. Escala de Beaufort – Velocidad del viento. Fuente: [OMM, 2008]	31
1.7. Localización geográfica de estaciones con registros de humedad relativa. Fuente: propia	33
1.8. Clasificación Climática- Caldas. Adaptada: [IDEAM, 2005a]	35
1.9. Clasificación de Lang. Adaptada: [IDEAM, 2005a]	36
1.10. Clasificación de Caldas- Lang. Adaptada: [IDEAM, 2005a]	36
2.1. Tabla de 71 entradas candidatas para la selección de variables.	57
2.2. Estadísticos subconjuntos de entrenamiento y prueba.	58
2.3. Configuración del NSGA-II para la selección de variables. Fuente: propia.	62
2.4. Subconjuntos de variables para el modelo de predicción con un conjunto de RNA. La denotación de las variables sigue la identificación dada en la Tabla 2.1. Adicionalmente las variables aparecen tabuladas para visualizar su participación en distintos esquemas de selección.	63
2.5. Esquema final de la selección de variables basada en el compromiso de tres funciones objetivo.	66
3.1. Límites máximos permisibles para niveles de inmisión de PM_{10} en Colombia.	76
3.2. Algunos estudios de calidad del aire con manejo de datos mediante la aplicación de Openair.	79

3.3. Características principales de las estaciones de monitoreo analizadas.	84
3.4. Características principales de las estaciones de monitoreo analizadas.	85
3.5. Comandos de Openair utilizados en el procedimiento analítico.	86
3.6. Comandos de MATLAB utilizados en el procedimiento analítico.	87
3.7. Resumen de estadísticos principales para PM_{10} en cada estación de monitoreo aplicando la función aqStats de Openair.	92
3.8. Promedios mensuales de PM_{10} para las tres estaciones desde Noviembre de 2011 hasta Junio de 2012	100
3.9. Parámetros estadísticos para las regresiones lineales realizadas entre las concentraciones de PM_{10} y cada variable meteorológica de las tres estaciones de monitoreo	103
3.10. Componentes Principales evaluados para los datos de las tres estaciones	105
3.11. Cargas de las variables meteorológicas en cada Componente Principal (Matriz de valores propios).	107
4.1. Características de algunas Estaciones de la Red. Fuente: propia.	118