

## Índice

TABLAS DE ILUSTRACIONES.....	vii
TABLAS.....	xi
ECUACIONES GENERALES.....	xiii
1 Capítulo I: Introducción .....	1
1.1 Descripción del Problema .....	3
1.2 Objetivos.....	4
1.2.1 Objetivo General:.....	4
1.2.2 Objetivos Específicos: .....	4
1.3 Resultados esperados y contribución de la tesis .....	4
1.4 Estructura de la Tesis.....	6
2 Capítulo II: El Problema del Vendedor Viajero.....	7
2.1 Revisión histórica .....	8
2.2 Descripción del problema.....	11
2.3 Alternativas de solución.....	13
2.3.1 Algoritmo de planos de corte usando Tecnología Concierto de CPLEX .....	13
2.3.2 Concorde .....	15
3 Capítulo III: Optimización Robusta.....	16
3.1 Descripción General .....	17
3.2 Modelo de <i>Min-Max Regret</i> .....	18
3.2.1 Modelo de Optimización Combinatorial con criterio de <i>Min-Max Regret</i> .....	19
4 Capítulo IV: El Problema del Vendedor Viajero Robusto.....	21
4.1 Descripción del Problema .....	22
4.2 Algoritmos exactos .....	24
4.2.1 Descomposición de Benders.....	25
4.3 Algoritmos heurísticos .....	27
4.3.1 Heurísticas de Kasperski & Zielinski .....	27
4.3.2 Heurística <i>n-HU</i> .....	29
4.4 Algoritmos metaheurísticos .....	31

4.4.1	Búsqueda Local.....	31
4.4.2	Simulated Annealing.....	34
5	Capítulo V: Experimentación Computacional y Análisis de Resultados .....	37
5.1	Instancias .....	38
5.2	Resultados de las Heurísticas .....	39
5.2.1	Sobre grafos de <i>TSPLib</i> con incertidumbre intervalar .....	40
5.2.2	Sobre grafos random.....	46
5.3	Análisis de resultados Heurísticas .....	47
5.3.1	Calidad de las soluciones.....	47
5.3.2	Tiempo de ejecución .....	55
5.3.3	Gap v/s Tiempo e Iteraciones .....	57
5.3.4	Parametrización de <i>n-HU</i> .....	62
5.3.5	Estudio en relación a amplitud de incertidumbre intervalar de grafos .....	64
5.4	Análisis de eficiencia en resolución de <i>MMR-TSP</i> .....	69
5.5	Resultados Metaheurísticas .....	70
6	Capítulo VI: Conclusión.....	71
7	Referencias Bibliográficas.....	75
8	Anexos.....	79
Anexo 1.	Tablas de experimentaciones .....	80
Anexo 1.1.	Tablas resultados grafos <i>TSPLib</i> con incertidumbre intervalar .....	80
Anexo 1.2.	Tablas resultados grafos <i>random</i> con incertidumbre intervalar .....	92
Anexo 2.	Gráficos de experimentaciones.....	99
Anexo 2.1.	Gráficas de características de robustez para grafos <i>TSPLib</i> .....	100
Anexo 2.2.	Gráficas de características de robustez para grafos random.....	112
Anexo 2.3.	Otras gráficas.....	120

## TABLAS DE ILUSTRACIONES

Ilustración 5.1: Características v/s algoritmos gr17-0.25 .....	48
Ilustración 5.2: Características v/s algoritmos R-10-100.....	49
Ilustración 5.3: <i>Gap</i> 's promedio para problemas resueltos <i>TSPLib</i> .....	50
Ilustración 5.4: <i>Gap</i> 's promedio problemas de <i>TSPLib</i> resueltos de manera óptima.....	51
Ilustración 5.5: <i>Gap</i> 's promedio problemas de <i>TSPLib</i> no resueltos al óptimo .....	51
Ilustración 5.6: <i>Gap</i> 's promedio para problemas <i>random</i> resueltos .....	52
Ilustración 5.7: <i>Gap</i> 's promedio problemas <i>random</i> resueltos de manera óptima.....	52
Ilustración 5.8: Número de instancias óptimas encontradas para problemas tipo <i>TSPLib</i> .....	53
Ilustración 5.9: Gráfico de cotas para problema gr48-0.50 .....	54
Ilustración 5.10: Gráfico de tiempos promedios para problemas tipo <i>TSPLib</i> .....	55
Ilustración 5.11: Gráfico en escala logarítmica del tiempo para problemas tipo <i>TSPLib</i> .....	56
Ilustración 5.12: Gráfica en escala logarítmica del tiempo para problemas <i>random</i> .....	57
Ilustración 5.13: Estudio iteraciones v/s <i>Gap</i> (%) problema gr48-0.50.....	58
Ilustración 5.14: Relación <i>Gap</i> (%) v/s Iteraciones problema gr48-0.50.....	58
Ilustración 5.15: Estudio <i>Gap</i> (%) v/s Tiempo instancia dantzig42-0.50.1.....	59
Ilustración 5.16: Comportamiento <i>Gap</i> y Tiempo v/s Iteraciones instancia dantzig42-0.50.1 .....	60
Ilustración 5.17: Comportamiento <i>Gap</i> y Tiempo v/s Iteraciones instancia gr48-0.50.1 .....	60
Ilustración 5.18: Comportamiento <i>Gap</i> y Tiempo v/s Iteraciones instancia si175-0.25.1 .....	61
Ilustración 5.19: Resultado heurística <i>n-HU</i> con $n=20$ para gr17-0.25.2 .....	63
Ilustración 5.20: Resultado heurística <i>n-HU</i> con $n=20$ para gr17-0.25.10.....	63
Ilustración 5.21: Estudio <i>Gap</i> (%) para problemas tipo <i>TSPLib</i> con $\beta=0.25$ .....	64
Ilustración 5.22: Estudio <i>Gap</i> (%) para problemas tipo <i>TSPLib</i> con $\beta=0.25$ resuelto al óptimo .....	65
Ilustración 5.23: Estudio <i>Gap</i> (%) para problemas tipo <i>TSPLib</i> con $\beta=0.50$ .....	65
Ilustración 5.24: Estudio <i>Gap</i> (%) para problemas tipo <i>TSPLib</i> con $\beta=0.50$ resuelto al óptimo .....	66

Ilustración 5.25: Estudio Tiempo para problemas tipo <i>TSPLib</i> con $\beta=0.25$ .....	67
Ilustración 5.26: Estudio Tiempo para problemas tipo <i>TSPLib</i> con $\beta=0.50$ .....	67
Ilustración 5.27: Estudio de Tiempo problema R-30 a diferentes valores parámetro <i>M</i> .....	68
Ilustración 5.28: Análisis de instancia swiss42-0.25.1 mediante KCachegrind .....	69
Ilustración 8.1: Características robustez gr17-0.25.....	100
Ilustración 8.2: Características robustez gr17-0.50.....	100
Ilustración 8.3: Características robustez gr21-0.25.....	101
Ilustración 8.4: Características robustez gr21-0.25.....	101
Ilustración 8.5: Características robustez gr24-0.25.....	102
Ilustración 8.6: Características robustez gr24-0.50.....	102
Ilustración 8.7: Características robustez fri26-0.25 .....	103
Ilustración 8.8: Características robustez fri26-0.50 .....	103
Ilustración 8.9: Características robustez dantzig42-0.25 .....	104
Ilustración 8.10: Características robustez dantzig42-0.50 .....	104
Ilustración 8.11: Características robustez swiss42-0.25 .....	105
Ilustración 8.12: Características robustez swiss42-0.50 .....	105
Ilustración 8.13: Características robustez gr48-0.25.....	106
Ilustración 8.14: Características robustez gr48-0.50.....	106
Ilustración 8.15: Características robustez hk48-0.25 .....	107
Ilustración 8.16: Características robustez hk48-0.50 .....	107
Ilustración 8.17: Características robustez brazil58-0.25 .....	108
Ilustración 8.18: Características robustez brazil58-0.50 .....	108
Ilustración 8.19: Características robustez gr120-0.25.....	109
Ilustración 8.20: Características robustez gr120-0.50.....	109
Ilustración 8.21: Características robustez si175-0.25 .....	110
Ilustración 8.22: Características robustez si175-0.50 .....	110
Ilustración 8.23: Características robustez brg180-0.25.....	111

Ilustración 8.24: Características robustez brg180-0.50.....	111
Ilustración 8.25: Características robustez R-10-100 .....	112
Ilustración 8.26: Características robustez R-10-1000 .....	112
Ilustración 8.27: Características robustez R-20-100 .....	113
Ilustración 8.28: Características robustez R-20-1000 .....	113
Ilustración 8.29: Características robustez R-30-10 .....	114
Ilustración 8.30: Características robustez R-30-100 .....	114
Ilustración 8.31: Características robustez R-30-1000 .....	115
Ilustración 8.32: Características robustez R-30-10000 .....	115
Ilustración 8.33: Características robustez R-40-100 .....	116
Ilustración 8.34: R-40-1000 .....	116
Ilustración 8.35: Características robustez R-50-100 .....	117
Ilustración 8.36: Características robustez R-50-1000 .....	117
Ilustración 8.37: Características robustez R-60-100 .....	118
Ilustración 8.38: Características robustez R-60-1000 .....	118
Ilustración 8.39: Características robustez R-80-1000 .....	119
Ilustración 8.40: Cotas de <i>regret</i> gr48-0.50.....	120
Ilustración 8.41: Iteraciones v/s Gap gr48-0.50.....	120
Ilustración 8.42: Cotas de <i>regret</i> hk48-0.50 .....	120
Ilustración 8.43: Iteraciones v/s Gap hk48-0.50.....	120
Ilustración 8.44: Cotas de <i>regret</i> brazil58-0.50 .....	121
Ilustración 8.45: Iteraciones v/s Gap brazil58-0.50 .....	121
Ilustración 8.46: Cotas de <i>regret</i> gr120-0.25.....	122
Ilustración 8.47: Iteraciones v/s Gap gr120-0.25 .....	122
Ilustración 8.48: Cotas de <i>regret</i> gr120-0.50.....	122
Ilustración 8.49: Iteraciones v/s Gap gr120-0.50 .....	122
Ilustración 8.50: Cotas de <i>regret</i> si175-0.25 .....	123

Ilustración 8.51: Iteraciones v/s Gap si175-0.25 .....	123
Ilustración 8.52: Cotas de <i>regret</i> si175-0.50 .....	123
Ilustración 8.53: Iteraciones v/s Gap si175-0.50 .....	123
Ilustración 8.54: Cotas de <i>regret</i> brg180-0.25.....	124
Ilustración 8.55: Iteraciones v/s Gap brg180-0.25 .....	124
Ilustración 8.56: Cotas de <i>regret</i> brg180-0.50.....	124
Ilustración 8.57: Cotas de <i>regret</i> R-50-1000 .....	125
Ilustración 8.58: Iteraciones v/s Gap R-50-1000 .....	125
Ilustración 8.59: Cotas de <i>regret</i> R-60-100 .....	126
Ilustración 8.60: Iteraciones v/s Gap R-60-100 .....	126
Ilustración 8.61: Cotas de <i>regret</i> R-60-1000 .....	126
Ilustración 8.62: Iteraciones v/s Gap R-60-1000.....	126
Ilustración 8.63: Cotas de <i>regret</i> R-80-1000 .....	127
Ilustración 8.64: Iteraciones v/s Gap R-80-1000.....	127

## TABLAS

Tabla 2.1: Hitos solución de TSP .....	10
Tabla 5.1: información resultados para problema gr17-0.25 .....	40
Tabla 5.2: Información resultados para problema gr24-0.25 .....	41
Tabla 5.3: Información resultados para problema gr24-0.50 .....	42
Tabla 5.4: Información resultados para problema swiss42-0.50.....	42
Tabla 5.5: Información resultados para problema gr48-0.50 .....	43
Tabla 5.6: Resumen indicadores problemas tipo TSPLib .....	44
Tabla 5.7: Resumen indicadores problemas random .....	46
Tabla 5.8: Resumen test n-HU con $n=20$ .....	62
Tabla 8.1: Resultados problema gr17-0.25 .....	80
Tabla 8.2: Resultados problema gr17-0.50 .....	80
Tabla 8.3: Resultados problema gr21-0.25 .....	81
Tabla 8.4: Resultados problema gr21-0.50 .....	81
Tabla 8.5: Resultados problema gr24-0.25 .....	82
Tabla 8.6: Resultados problema gr24-0.50 .....	82
Tabla 8.7: Resultados problema fri26-0.25 .....	83
Tabla 8.8: Resultados problema fri26-0.50 .....	83
Tabla 8.9: Resultados problema dantzig42-0.25 .....	84
Tabla 8.10: Resultados problema dantzig42-0.50 .....	84
Tabla 8.11: Resultados problema swiss42-0.25 .....	85
Tabla 8.12: Resultados problema swiss42-0.50 .....	85
Tabla 8.13: Resultados problema gr48-0.25 .....	86
Tabla 8.14: Resultados problema gr48-0.50 .....	86
Tabla 8.15: Resultados problema hk48-0.25 .....	87

Tabla 8.16: Resultados problema hk48-0.50 .....	87
Tabla 8.17: Resultados problema brazil58-0.25 .....	88
Tabla 8.18: Resultados problema brazil58-0.50 .....	88
Tabla 8.19: Resultados problema gr120-0.25 .....	89
Tabla 8.20: Resultados problema gr120-0.50 .....	89
Tabla 8.21: Resultados problema si175-0.25.....	90
Tabla 8.22: Resultados problema si175-0.50.....	90
Tabla 8.23: Resultados problema brg180-0.25.....	91
Tabla 8.24: Resultados problema brg180-0.50.....	91
Tabla 8.25: Resultados problema R-10-100 .....	92
Tabla 8.26: Resultados problema R-10-1000 .....	92
Tabla 8.27: Resultados problema R-20-100 .....	93
Tabla 8.28: Resultados problema R-20-1000 .....	93
Tabla 8.29: Resultados problema R-30-10 .....	94
Tabla 8.30: Resultados problema R-30-100 .....	94
Tabla 8.31: Resultados problema R-30-1000 .....	95
Tabla 8.32: Resultados problema R-30-10000 .....	95
Tabla 8.33: Resultados problema R-40-100 .....	96
Tabla 8.34: Resultados problema R-40-1000 .....	96
Tabla 8.35: Resultados problema R-50-100 .....	97
Tabla 8.36: Resultados problema R-50-1000 .....	97
Tabla 8.37: Resultados problema R-60-100 .....	98
Tabla 8.38: Resultados problema R-60-1000 .....	98
Tabla 8.39: Resultados problema R-80-1000 .....	99



## ECUACIONES GENERALES

(2.1) .....	11
(2.2) .....	11
(2.3) .....	11
(2.4) .....	11
(2.5) .....	11
(2.6) .....	12
(2.7) .....	12
(2.8) .....	14
(3.1) .....	19
(3.2) .....	19
(3.3) .....	20
(3.4) .....	20
(3.5) .....	20
(3.6) .....	20
(4.1) .....	22
(4.2) .....	23
(4.3) .....	23
(4.4) .....	23
(4.5) .....	24
(4.6) .....	24
(4.7) .....	24
(4.8) .....	26
(4.9) .....	26
(4.10) .....	28

(4.11) ..... 28  
(4.12) ..... 29  
(4.13) ..... 29  
(4.14) ..... 30  
(4.15) ..... 32  
(4.16) ..... 33  
(4.17) ..... 35  
(4.18) ..... 35  
(5.1) ..... 39