UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA TERRA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA E MEIO AMBIENTE

UM ESTUDO SOBRE A DINÂMICA DE SISTEMAS COMPLEXOS A PARTIR DE SÉRIES TEMPORAIS DE DADOS MICROCLIMATOLÓGICOS PARA UMA FLORESTA DE TRANSIÇÃO NO NOROESTE DE MATO GROSSO

MÁRCIA MARTIM PEREIRA GALLON

ORIENTADOR: PROF. DR. SÉRGIO ROBERTO DE PAULO

Cuiabá, MT, Abril de 2005

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA TERRA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA E MEIO AMBIENTE

UM ESTUDO SOBRE A DINÂMICA DE SISTEMAS COMPLEXOS A PARTIR DE SÉRIES TEMPORAIS DE DADOS MICROCLIMATOLÓGICOS PARA UMA FLORESTA DE TRANSIÇÃO NO NOROESTE DE MATO GROSSO

MÁRCIA MARTIM PEREIRA GALLON

Dissertação apresentada ao programa de Pós-graduação em Física e Meio Ambiente da Universidade Federal de Mato Grosso, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Física e Meio Ambiente.

ORIENTADOR: PROF. DR. SÉRGIO ROBERTO DE PAULO

Cuiabá, MT, Abril de 2005

DEDICATÓRIA

A Deus pela vida, a meus pais Erni e Mércia que sempre me apoiaram e sempre estiveram ao meu lado em todos os momentos de minha vida, ao meu marido Rogério pelo seu amor e compreensão e ao meu querido filho Frederico que é a luz do meu caminho e meu motivo para viver e lutar pelos meus sonhos.

AGRADECIMENTOS

- A Deus e Nossa Senhora, por sempre estarem comigo e minha família, dando forças e nos protegendo.
- Ao meu esposo Rogério Antonio Gallon, que mesmo com suas dificuldades sempre me ajuda e apóia em todas as minhas escolhas.
- Aos meus pais Erni e Mércia pelo seu apoio, compreensão e amor incondicional.
- A meu querido filho Frederico, que com sua alegria e inocência, sempre tornam os meus dias mais felizes.
- Ao LBA (Experimento de Grande Escala da Biosfera-Atmosfera na Amazônia), pelo apoio financeiro nas pesquisas em Sinop.
- À Universidade Federal de Mato Grosso, especialmente ao Departamento de Física, pela possibilidade de fazer este Mestrado.
- Ao meu orientador Prof. Dr. Sérgio Roberto de Paulo, por ter acreditado em mim, mesmo com minhas limitações e pela sua orientação e apoio nessa dissertação, sem a qual eu não teria conseguido.
- Ao Prof. Dr. José de Souza Nogueira, pela sua orientação quando aluna do curso de Física, para fazer um Mestrado em uma área multidisciplinar.
- Ao Prof. Dr. Nicolau Priante Filho, por ter me ensinado novamente a estudar na disciplina de Termodinâmica, e por sua atenção e cobrança para com todos nós no Mestrado.
- À Profa. Dra. Marta Cristina de Jesus Albuquerque Nogueira, por sua presença carinhosa e amiga, sempre buscando o melhor, para todos nós mestrandos e para o Mestrado em Física e Meio Ambiente.
- Ao nosso grande amigo e colaborador Mauro Massao Shiota Hayashi que nos deixou em Janeiro para continuar a sua grande obra junto de Deus no céu.
- A Dra. Luciana Sanches, por seu apoio e paciência, mesmo quando a tiramos de suas prioridades para nos ajudar.
- Ao Prof. Dr. José Holanda Campelo Júnior, pela sua atenção, disponibilidade e por todo conhecimento que sempre nos passou em suas aulas e fora delas também.
- Ao Prof. Dr. George Vourlitis, pela sua atenção e colaboração quando vem ao Brasil e principalmente na Conferência em Brasília.

- A Soilce Carrilho, por sua amizade e colaboração desde o início do mestrado.
- À minha amiga e "co-orientadora" Carla Maria Abido Valentini, que com sua alegria e inteligência sempre esteve ao meu lado, disponibilizando seu precioso tempo para ajudar-me.
- À minha querida amiga Eliane, que sempre esteve ao meu lado em todos os momentos deste mestrado, ajudando e partilhando os momentos felizes e tristes, e que nas viagens a Sinop sempre tornou nossos dias mais felizes.
- Aos meus colegas do curso de Mestrado, em especial minha amiga e professora de Excel Gisele Baldissera.
- À Márcia E. Klein, que com sua bondade e delicadeza muito ajudou nas horas difíceis de trabalhar com o programa ENWATBAL.
- À Fernanda, Marina, Jonas, Renata, Mário, Luiz Fernando, Nicácio, Eduardo e todos os que colaboraram nas coletas de dados em Santo Antônio, para o ENWATBAL e pelos momentos felizes que tivemos juntos.
- Ao Durval, Pedro Priante, Carlos e todos os bolsistas que estiveram junto nas viagens a Sinop, especialmente à Vanessa.
- Ao Jean Reinildes Pinheiro, por ajudar-me com as descrições dos equipamentos na torre de Sinop.
- A todos que de alguma forma me ajudaram, agradeço de todo coração.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS..... i
LISTA DE TABELAS..... vi
RESUMO..... vii
ABSTRACT..... viii
1. INTRODUÇÃO..... 1
2. REVISÃO DE LITERATURA..... 3
2.1. Teoria do Fluxo Turbulento Junto à Superfície do Solo..... 3
2.1.1. Método do Balanço de Energia..... 5
2.1.2. Método do Balanço de Energia pela Razão de Bowen..... 6
2.1.3. Métodos Micrometeorológicos..... 8
2.1.3.1. Método de Correlação de Vórtices Turbulentos..... 8
2.1.3.2. Método Baseado em Gradiente..... 9
2.1.3.3. Método Aerodinâmico..... 10
2.1.4. Fluxo de CO_2..... 11
2.2. Incertezas em Relação ao Fluxo de CO_2..... 13
2.2.1. Modelos Computacionais de Simulação de Mudanças Climáticas..... 15
3. MATERIAL E MÉTODOS..... 18
3.1. Localização da Área de Estudo..... 18
3.1.1. Vegetação e Clima..... 20
3.1.2. Instrumentos Micrometeorológicos..... 21
3.2. Metodologia..... 23
3.2.1. Método de Análise..... 23
3.2.1.1 Atratores..... 24
3.2.1.2.Atratores Quase Periódicos: Toróides Invariáveis..... 26
3.2.1.3.Atratores Não Periódicos: Fractais..... 27
3.2.2**.** Método Utilizado no Trabalho..... 30
3.3. Tratamento dos Dados..... 35
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO..... 39
4.1.O Atrator Climático..... 39
4.1.1. Resultados para o Fluxo de CO_2 (*Fc*)..... 40
4.1.2. Resultados para o Fluxo de Calor Latente (*LE*)..... 67
4.1.3. Resultados para o Fluxo de Calor Sensível *(H*)..... 83
5. CONCLUSÕES..... 104
5.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS..... 106
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... 107

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Mapa do Brasil, com as coordenadas do local de estudo..... 19
Figura 2. Mapa do Estado de Mato Grosso..... 19
Figura 3.Esquema do sistema de medições micrometeorológicas de correlação de vórtices turbulentos (ou *eddy covariance*)..... 20
Figura 4. Convergência das trajetórias de um sistema de tempo dinâmico contínuo. (a) Ciclo de ordem 1. (b) Ciclo de ordem dois..... 26
Figura 5. Atrator toroidal, com uma curva fechada (*C*) correspondente à intersecção com uma superfície de Poincaré..... 26
Figura 6 Construção do conjunto de Cantor (ou a poeira de Cantor). Seções sombreadas têm as porções do centro eliminadas em partições sucessivas dos segmentos de linha dentro da terça parte..... 28
Figura 7. Ilustração do conceito de dimensionalidade *d*, de um conjunto *D*..... 29
Figura 8. Espaço de fase dos dados de *Fc*, para Jan/01 e $n = 2$, com uma circunferência de raio *r* para avaliação do grau de correlação dos dados. 32
Figura 9. Inclinação de *ln C*(*r*) *versus ln r*..... 34
Figura 10. Representação da dimensionalidade do atrator (*d*) e do número mínimo de variáveis (*n*), necessárias para o conhecimento do modelo representado pelo atrator..... 35
Figura 11. (a) Representação de *ln C*(*r*) *versus ln r* para o Fluxo de CO_2 (*Fc*) para o Período Chuvoso (Fev/01), e τ = 1:00 *h*. (b) Dependência da dimensionalidade (*d*) em relação ao número das variáveis do espaço de fase (*n*)..... 42
Figura 12. (a) Representação de *ln C*(*r*) versus *ln r* para o Fluxo de CO_2 (*Fc*) para o Período Chuvoso (Fev/01) e τ = 1:30 *h*. (b) Dependência da dimensionalidade (*d*) em relação ao número das variáveis do espaço de fase (*n*)..... 43
Figura 13. (a) Representação de *ln C*(*r*) versus *ln r* para o Fluxo de CO_2 (*Fc*) para o período chuvoso (Fev/01) e τ = 2:30 *h*. (b) Dependência da dimensionalidade (*d*) em relação ao número das variáveis do espaço de fase (*n*)..... 44
Figura 14. (a) Representação de *ln C*(*r*) versus *ln r* para o Fluxo de CO_2 (*Fc*) para o Período Chuvoso (Fev/01) e τ = 3 *h*. (b) Dependência da dimensionalidade (*d*) em relação ao número das variáveis do espaço de fase (*n*)..... 45
Figura 15. (a) Representação de *ln C*(*r*) versus *ln r* para o Fluxo de CO_2 (*Fc*) para o Período Chuvoso (Fev/01) e τ = 5:30 *h*. (b) Dependência da dimensionalidade (*d*) em relação ao número das variáveis do espaço de fase (*n*)..... 46
Figura 16. (a) Representação de *ln C*(*r*) versus *ln r* para o Fluxo de CO_2 (*Fc*) para o Período Chuvoso (Fev/01) e τ = 18:30 *h*. (b) Dependência da dimensionalidade (*d*) em relação ao número das variáveis do espaço de fase (*n*)..... 47
Figura 17. (a) Representação de *ln C*(*r*) versus *ln r* para o Fluxo de CO_2 (*Fc*) para o Período Seco (Jul/00) e τ = 1 *h*. (b) Dependência da dimensionalidade (*d*) em relação ao número das variáveis do espaço de 48

fase (*n*).....
Figura 18. (a) Representação de *ln C*(*r*) versus *ln r* para o Fluxo de CO_2 (*Fc*) para o Período Seco (Jul/00) e τ = 1:30 *h*. (b) Dependência da dimensionalidade (*d*) em relação ao número das variáveis do espaço de fase (*n*)..... 49
Figura 19. (a) Representação de *ln C*(*r*) versus *ln r* para o Fluxo de CO_2 (*Fc*) para o Período Seco (Jul/00) e τ = 2:30 *h*. (b) Dependência da dimensionalidade (*d*) em relação ao número das variáveis do espaço de fase (*n*)..... 50
Figura 20. (a) Representação de *ln C*(*r*) versus *ln r* para o Fluxo de CO_2 (*Fc*) para o Período Seco (Jul/00) e τ = 3 *h*. (b) Dependência da dimensionalidade (*d*) em relação ao número das variáveis do espaço de fase (*n*)..... 51
Figura 21. (a) Representação de *ln C*(*r*) versus *ln r* para o Fluxo de CO_2 (*Fc*) para o Período Seco (Jul/00) e τ = 5:30 *h*. (b) Dependência da dimensionalidade (*d*) em relação ao número das variáveis do espaço de fase (*n*)..... 52
Figura 22. (a) Representação de *ln C*(*r*) versus *ln r* para o Fluxo de CO_2 (*Fc*) para o Período Seco (Jul/00) e τ = 18:30 *h*. (b) Dependência da dimensionalidade (*d*) em relação ao número das variáveis do espaço de fase (*n*)..... 53
Figura 23. (a) Representação de *ln C*(*r*) versus *ln r* para o Fluxo de CO_2 (*Fc*) para o Período Seco (Ago/02) e τ = 1 *h*. (b) Dependência da dimensionalidade (*d*) em relação ao número das variáveis do espaço de fase (*n*)..... 54
Figura 24. (a) Representação de *ln C*(*r*) versus *ln r* para o Fluxo de CO_2 (*Fc*) para o Período Seco (Ago/02) e τ = 1:30 *h*. (b) Dependência da dimensionalidade (*d*) em relação ao número das variáveis do espaço de fase (*n*)..... 55
Figura 25. (a) Representação de *ln C*(*r*) versus *ln r* para o Fluxo de CO_2 (*Fc*) para o Período Seco (Ago/02) e τ = 2:30 *h*. (b) Dependência da dimensionalidade (*d*) em relação ao número das variáveis do espaço de fase (*n*)..... 56
Figura 26. (a) Representação de *ln C*(*r*) versus *ln r* para o Fluxo de CO_2 (*Fc*) para o Período Seco (Ago/02) e τ = 3 *h*. (b) Dependência da dimensionalidade (*d*) em relação ao número das variáveis do espaço de fase (*n*)..... 57
Figura 27. (a) Representação *de ln C*(*r*) versus *ln r* para o Fluxo de CO_2 (*Fc*) para o Período Seco (Ago/02) e τ = 5:30 *h*. (b) Dependência da dimensionalidade (*d*) em relação ao número das variáveis do espaço de fase (*n*)..... 58
Figura 28. (a) Representação de *ln C*(*r*) versus *ln r* para o Fluxo de CO_2 (*Fc*) para o Período Seco (Ago/02) e τ = 18:30 *h*. (b) Dependência da dimensionalidade (*d*) em relação ao número das variáveis do espaço de fase (*n*)..... 59
Figura 29. Perfil de fase da evolução temporal do Fluxo de CO_2 (*Fc*) para Fev/01 e τ = 1 *h*..... 60

Figura 30. Perfil de fase da evolução temporal do Fluxo de CO_2 (*Fc*) para Fev/01 e τ = 1:30 *h*..... 60
Figura 31. Perfil de fase da evolução temporal do Fluxo de CO_2 (*Fc*) para Fev/01 e τ = 2:30 *h*..... 61
Figura 32. Perfil de fase da evolução temporal do Fluxo de CO_2 (*Fc*) para Fev/01 e τ = 3 *h*..... 61
Figura 33. Perfil de fase da evolução temporal do Fluxo de CO_2 (*Fc*) para Fev/01 e τ = 5:30 *h*..... 62
Figura 34. Perfil de fase da evolução temporal do Fluxo de CO_2 (*Fc*) para Jul/00 e τ = 1 *h*..... 62
Figura 35. Perfil de fase da evolução temporal do Fluxo de CO_2 (*Fc*) para Jul/00 e τ = 1:30 *h*..... 63
Figura 36. Perfil de fase da evolução temporal do Fluxo de CO_2 (*Fc*) para Jul/00 e τ = 2:30 *h*..... 63
Figura 37. Perfil de fase da evolução temporal do Fluxo de CO_2 (*Fc*) para Jul/00 e τ = 3 *h*..... 64
Figura 38. Perfil de fase da evolução temporal do Fluxo de CO_2 (*Fc*) para Jul/00 e τ = 5:30 *h*..... 64
Figura 39. Perfil de fase da evolução temporal do Fluxo de CO_2 (*Fc*) para Ago/02 e τ = 1 *h*..... 65
Figura 40. Perfil de fase da evolução temporal do Fluxo de CO_2 (*Fc*) para Ago/02 e τ = 1:30 *h*..... 65
Figura 41. Perfil de fase da evolução temporal do Fluxo de CO_2 (*Fc*) para Ago/02 e τ = 2:30 *h*..... 66
Figura 42. Perfil de fase da evolução temporal do Fluxo de CO_2 (*Fc*) para Ago/02 e τ = 3 *h*..... 66
Figura 43. Perfil de fase da evolução temporal do Fluxo de CO_2 (*Fc*) para Ago/02 e τ = 5:30 *h*..... 67
Figura 44. (a) Representação de *ln C*(*r*) versus *ln r* para o Fluxo de Calor Latente (*LE*) para o Período Chuvoso (Fev/01) e τ = 3 *h*. Dependência da dimensionalidade (*d*) em relação ao número das variáveis do espaço de fase (*n*)..... 69
Figura 45. (a) Representação de *ln C*(*r*) versus *ln r* para o Fluxo de Calor Latente (*LE*) para o Período Chuvoso (Fev/01) e τ = 18:30 *h*. Dependência da dimensionalidade (*d*) em relação ao número das variáveis do espaço de fase (*n*)..... 70
Figura 46. (a) Representação de *ln C*(*r*) versus *ln r* para o Fluxo de Calor Latente (*LE*) para o Período Seco (Jun/01) e τ = 3 *h*. (b) Dependência da dimensionalidade (*d*) em relação ao número das variáveis do espaço de fase (*n*)..... 71
Figura 47. (a) Representação de *ln C*(*r*) versus *ln r* para o Fluxo de Calor Latente (*LE*) para o Período Seco (Jun/01) e τ = 18:30 *h*. Dependência da dimensionalidade (*d*) em relação ao número das variáveis do espaço de fase (*n*)..... 72
Figura 48. (a) Representação de *ln C*(*r*) versus *ln r* para o Fluxo de Calor Latente (*LE*) para o Período Intermediário Chuvoso Seco e τ = 3 *h*. Dependência da dimensionalidade (*d*) em relação ao número das

variáveis do espaço de fase (*n*)..... 73
Figura 49. (a) Representação de *ln C*(*r*) versus *ln r* para o Fluxo de Calor Latente (*LE*) para o Período Seco (Ago/02) e τ = 3 *h*. Dependência da dimensionalidade (*d*) em relação ao número das variáveis do espaço de fase (*n*)..... 74
Figura 50. (a) Representação de *ln C*(*r*) versus *ln r* para o Fluxo de Calor Latente (*LE*) para o Período Seco (Ago/02) e τ = 18:30 *h*. Dependência da dimensionalidade (*d*) em relação ao número das variáveis do espaço de fase (*n*)..... 75
Figura 51. Perfil de fase da evolução temporal do Fluxo de Calor Latente (*LE*) para Fev/01 e τ = 1 *h*..... 76
Figura 52. Perfil de fase da evolução temporal do Fluxo de Calor Latente (*LE*) para Fev/01 e τ = 1:30 *h*..... 76
Figura 53. Perfil de fase da evolução temporal do Fluxo de Calor Latente (*LE*) para Fev/01 e τ = 2:30 *h*..... 77
Figura 54. Perfil de fase da evolução temporal do Fluxo de Calor Latente (*LE*) para Fev/01 e τ = 3 *h*..... 77
Figura 55. Perfil de fase da evolução temporal do Fluxo de Calor Latente (*LE*) para Fev/01 e τ = 5:30 *h*..... 78
Figura 56. Perfil de fase da evolução temporal do Fluxo de Calor Latente (*LE*) para Jun/01 e τ = 1 *h*..... 78
Figura 57. Perfil de fase da evolução temporal do Fluxo de Calor Latente (*LE*) para Jun/01 e τ = 1:30 *h*..... 79
Figura 58. Perfil de fase da evolução temporal do Fluxo de Calor Latente (*LE*) para Jun/01 e τ = 2:30 *h*..... 79
Figura 59. Perfil de fase da evolução temporal do Fluxo de Calor Latente (*LE*) para Jun/01 e τ = 3 *h*..... 80
Figura 60. Perfil de fase da evolução temporal do Fluxo de Calor Latente (*LE*) para Jun/01 e τ = 5:30 *h*..... 80
Figura 61. Perfil de fase da evolução temporal do Fluxo de Calor Latente (*LE*) para Ago/02 e τ = 1 *h*..... 81
Figura 62. Perfil de fase da evolução temporal do Fluxo de Calor Latente (*LE*) para Ago/02 e τ = 1:30 *h*..... 81
Figura 63. Perfil de fase da evolução temporal do Fluxo de Calor Latente (*LE*) para Ago/02 e τ = 2:30 *h*..... 82
Figura 64. Perfil de fase da evolução temporal do Fluxo de Calor Latente (*LE*) para Ago/02 e τ = 3 *h*..... 82
Figura 65. Perfil de fase da evolução temporal do Fluxo de Calor Latente (*LE*) para Ago/02 e τ = 5:30 *h*..... 83
Figura 66. (a) Representação de *ln C*(*r*) versus *ln r* para o Fluxo de Calor Sensível (*H*) para o Período Chuvoso (Fev/01) e τ = 3 *h*. Dependência da dimensionalidade (*d*) em relação ao número das variáveis do espaço de fase (*n*)..... 85
Figura 67. (a) Representação de *ln C*(*r*) versus *ln r* para o Fluxo de Calor Sensível (*H*) para o Período Chuvoso (Fev/01) e τ = 18:30 *h*. (b) Dependência da dimensionalidade (*d*) em relação ao número das variáveis do espaço de fase (*n*)..... 86

Figura 68. (a) Representação de *ln C*(*r*) versus *ln r* para o Fluxo de Calor Sensível (*H*) para o Período Seco (Jun/01) e τ = 3 *h*. (b) Dependência da dimensionalidade (*d*) em relação ao número das variáveis do espaço de fase (*n*)..... 87
Figura 69. (a) Representação de *ln C*(*r*) versus *ln r* para o Fluxo de Calor Sensível (*H*) para o Período Seco (Jun/01) e τ = 18:30 *h*. (b) Dependência da dimensionalidade (*d*) em relação ao número das variáveis do espaço de fase (*n*)..... 88
Figura 70. (a) Representação de *ln C*(*r*) versus *ln r* para o Fluxo de Calor Sensível (*H*) para o Período Seco (Ago/02) e τ = 3 *h*. (b) Dependência da dimensionalidade (*d*) em relação ao número das variáveis do espaço de fase (*n*)..... 89
Figura 71. (a) Representação de *ln C*(*r*) versus *ln r* para o Fluxo de Calor Sensível (*H*) para o Período Seco (Ago/02) e τ = 18:30 *h*. (b) Dependência da dimensionalidade (*d*) em relação ao número das variáveis do espaço de fase (*n*)..... 90
Figura 72. (a) Representação de *ln C*(*r*) versus *ln r* para o Fluxo de Calor Sensível (*H*) para o Período Chuvoso (Dez/02) e τ = 3 *h*. (b) Dependência da dimensionalidade (*d*) em relação ao número das variáveis do espaço de fase (*n*)..... 91
Figura 73. (a) Representação de *ln C*(*r*) versus *ln r* para o Fluxo de Calor Sensível (*H*) para o Período Chuvoso e τ = 18:30 *h*. (b) Dependência da dimensionalidade (*d*) em relação ao número das variáveis do espaço de fase (*n*)..... 92
Figura 74. Perfil de fase da evolução temporal do Fluxo de Calor Sensível (*H*) para Fev/01 e τ = 1 *h*..... 93
Figura 75. Perfil de fase da evolução temporal do Fluxo de Calor Sensível (*H*) para Fev/01 e τ = 1:30 *h*..... 93
Figura 76. Perfil de fase da evolução temporal do Fluxo de Calor Sensível (*H*) para Fev/01 e τ = 2:30 *h*..... 94
Figura 77. Perfil de fase da evolução temporal do Fluxo de Calor Sensível (*H*) para Fev/01 e τ = 3 *h*..... 94
Figura 78. Perfil de fase da evolução temporal do Fluxo de Calor Sensível (*H*) para Fev/01 e τ = 5:30 *h*..... 95
Figura 79. Perfil de fase da evolução temporal do Fluxo de Calor Sensível (*H*) para Jun/01 e τ = 1 *h*..... 95
Figura 80. Perfil de fase da evolução temporal do Fluxo de Calor Sensível (*H*) para Jun/01 e τ = 1:30 *h*..... 96
Figura 81. Perfil de fase da evolução temporal do Fluxo de Calor Sensível (*H*) para Jun/01 e τ = 2:30 *h*..... 96
Figura 82. Perfil de fase da evolução temporal do Fluxo de Calor Sensível (*H*) para Jun/01 e τ = 3 *h*..... 97
Figura 83. Perfil de fase da evolução temporal do Fluxo de Calor Sensível (*H*) para Jun/01 e τ = 5:30 *h*..... 97
Figura 84. Perfil de fase da evolução temporal do Fluxo de Calor Sensível (*H*) para Ago/02 e τ = 1 *h*..... 98
Figura 85. Perfil de fase da evolução temporal do Fluxo de Calor Sensível

(*H*) para Ago/02 e τ = 1:30 *h*..... 98
Figura 86. Perfil de fase da evolução temporal do Fluxo de Calor Sensível (*H*) para Ago/02 e τ = 2:30 *h*..... 99
Figura 87. Perfil de fase da evolução temporal do Fluxo de Calor Sensível (*H*) para Ago/02 e τ = 3 *h*..... 99
Figura 88. Perfil de fase da evolução temporal do Fluxo de Calor Sensível (*H*) para Ago/02 e τ = 5:30 *h*..... 100
Figura 89. Perfil de fase da evolução temporal do Fluxo de Calor Sensível (*H*) para Dez/02 e τ = 1 *h*..... 100
Figura 90. Perfil de fase da evolução temporal do Fluxo de Calor Sensível (*H*) para Dez/02 e τ = 1:30 *h*..... 101
Figura 91. Perfil de fase da evolução temporal do Fluxo de Calor Sensível (*H*) para Dez/02 e τ = 2:30 *h*..... 101
Figura 92. Perfil de fase da evolução temporal do Fluxo de Calor Sensível (*H*) para Dez/02 e τ =3 *h*..... 102
Figura 93. Perfil de fase da evolução temporal do Fluxo de Calor Sensível (*H*) para Dez/02 e τ = 5:30 *h*..... 102

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Precipitação mensal para a área em estudo..... 21
Tabela 2. Conjunto de dados extraídos da planilha eletrônica do Microsoft Excel, para τ = 30 minutos e n = 7..... 33
Tabela 3. Meses e horários em que ocorreram as piores correlações para os valores de *LE*, *H* e *Fc*..... 37
Tabela 4. Fluxo de CO_2 (*Fc*) em relação à dimensionalidade do atrator (*d*), a defasagem (τ) e o número de variáveis do espaço de fase (*n*)..... 41
Tabela 5. Fluxo de Calor Latente (*LE*) em relação à dimensionalidade do atrator (*d*), a defasagem (τ) e o número de variáveis do espaço de fase (*n*)..... 68
Tabela 6. Fluxo de Calor Sensível (*H*) em relação à dimensionalidade do atrator (*d*), a defasagem (τ) e o número de variáveis do espaço de fase (*n*)..... 84

RESUMO

GALLON, M. M. P. **Um estudo sobre a dinâmica de sistemas complexos a partir de séries temporais de dados microclimatológicos para uma floresta de Transição no Noroeste de Mato Grosso.** Cuiabá, 2005. 115p. Dissertação (Mestrado) - Física e Meio Ambiente, Universidade Federal de Mato Grosso.

O presente estudo foi desenvolvido na Amazônia Legal, em uma área pertencente à Fazenda Maracaí - MT (11°24.75'S; 55°19.50'O). A área é constituída por uma floresta de transição, entre a floresta tropical úmida e o cerrado, como parte do projeto "Experimento de Grande Escala da Biosfera Atmosfera na Amazônia (LBA)". Os dados foram coletados ao longo dos anos de 1999 a 2003. Neste estudo, foram analisados os fluxos de CO_2 (*Fc*), calor latente (*LE*) e calor sensível (*H*), medidos com o método de correlação de vórtices turbulentos, através das dinâmicas de sistemas complexos de séries temporais baseadas em uma metodologia desenvolvida por NICOLIS e PRIGOGINE (1998). Foram avaliadas quantas variáveis seriam necessárias para modelar cada fluxo e, se a sazonalidade influenciaria nesta quantificação das variáveis. Os resultados mostram que são necessárias, ao menos, seis variáveis para modelar os fluxos e que, aos dados, estão associados atratores fractais de baixa dimensionalidade.

Palavras-chave: Séries Temporais, Atratores, Baixa Dimensionalidade.

ABSTRACT

GALLON, M. M. P. **A study on complex dynamics of time series of microclimatological data in a transition forest in Northwest of Mato Grosso.** Cuiabá, 2005. 115p. Dissertação (Mestrado) - Física e Meio Ambiente, Universidade Federal de Mato Grosso.

This study was done at Legal Amazon, in an area concerning at Macaraí farm - MT, (11°24.75'S; 55°19.50'O). The area is constituted by a transition forest, between the wet forest tropical one and Brazilian savannah, as part of the "Large-Scale Biosphere-Atmosphere Experiment in Amazonian (LBA) project". The datas were collected along of 1999 to 2003 years. In this study, were exanimate CO_2 (*Fc*), latent heat (*LE*) and sensitive heat (*H*) fluxes, measured with the eddy covariance method, through the complex system dynamics at the time series based at one methodology developed by NICOLIS and PRIGOGINE (1998). Was evaluated how many are needed variables to model every flux and, the seasonality influence at this variables quantification. The results proved that at least six variables are needed in order to model the fluxes and there are fractal attractors with low dimensionality associated with the data.

Keywords: Time Series, Attractors, Low Dimensionality.

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a Amazônia Legal tem sido um dos focos principais de atenção mundial devido à sua enorme riqueza mineral, à sua biodiversidade de espécies florestais e aos efeitos que o desmatamento em grande escala pode provocar no clima, na hidrologia e nos ciclos biogeoquímicos em escala regional e global.

Os desmatamentos, queimadas e queima de combustíveis fósseis liberam na atmosfera gases componentes do efeito estufa natural como metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O) e, principalmente, o dióxido de carbono (CO_2), que é um dos gases que tem aumentado muito após a revolução industrial, passando de 285 ppm para 366 ppm, de acordo com o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2001). O aumento de CO_2 em conjunto com outros gases de efeito estufa (GEE) de emissão antropogênica, tais como hidrofluorcarbonos e perfluorcarbonos são responsáveis pelas mudanças no microclima da região, amplificando o efeito estufa com possíveis desdobramentos em escalas globais.

Este desequilíbrio climático provoca maior absorção de radiação infravermelha e seu aprisionamento na superfície da Terra, o que poderá influenciar na precipitação, na movimentação das massas de ar e nas trocas de fluxos de energia, podendo acarretar mudanças climáticas sensíveis em curto tempo.

O efeito estufa natural é um fenômeno benéfico para o nosso planeta, provocado pelos gases constituintes da atmosfera que absorvem e reemitem a radiação infravermelha emitida pelo solo, plantas e seres vivos em geral, regulando a temperatura média global em torno de 15 °C, o que propicia a existência de água nas três formas (líquida, vapor e gelo), possibilitando, desta forma, a existência de vida na Terra.

O desmatamento e as queimadas, comuns na região amazônica para preparar a terra para o plantio e pastagens, se não forem devidamente controlados podem provocar um grande desequilíbrio no balanço de energia regional. Para se prever o que poderá acontecer no futuro não é necessário fazer da Amazônia Legal um "Laboratório de Experimentos", os modelos matemáticos de simulação podem avaliar o que acontecerá em um futuro próximo ou distante, se o desequilíbrio persistir em grande escala.

Os modelos matemáticos que simulam o clima podem ser simples ou, como em muitos casos, complexos. Eles buscam representar o comportamento da atmosfera através da interação dos diversos elementos do sistema climático e, para serem eficientes, é necessário que sejam uma representação adequada dos processos de transferência de massa e energia. Para sua utilização, torna-se necessário o conhecimento prévio de dados de entrada estipulados em cada modelo. Em todos os modelos matemáticos de simulação, sempre existe uma margem de erro que pode ser grande ou pequena, dependendo da complexidade entre as interações das diferentes variáveis analisadas. Uma das dificuldades consiste em determinar quantas e quais variáveis de entrada devem ser analisadas para cada ecossistema estudado.

Devido à importância em se conhecer a Amazônia Legal e seus ecossistemas, o presente estudo foi desenvolvido numa Floresta de Transição Amazônia Cerrado, próximo ao município de Sinop - Mato Grosso com o objetivo principal de determinar quantas variáveis de entrada seriam necessárias em modelos teóricos para explicar o Fluxo de Calor Latente (*LE*), Fluxo de Calor Sensível (*H*) e Fluxo de CO_2 (*Fc*) utilizando o método proposto por NICOLIS e PRIGOGINE (1998).

2. REVISÃO DE LITERATURA

Neste capítulo serão apresentados parte dos componentes dos fluxos de massa (CO_2) e energia (*LE* e *H*) ou que têm relação direta com eles e, por isso, são importantes para a compreensão do conjunto de variáveis envolvidas no presente estudo.

2.1. TEORIA DO FLUXO TURBULENTO JUNTO À SUPERFÍCIE DO SOLO

O fluxo turbulento junto ao solo é o que ocasiona as movimentações das massas de ar próximas ao solo em uma camada fina acima da superfície e que levam consigo os fluxos de CO_2 e vapor d'água entre outros, o que provoca a difusão turbulenta, que é um dos parâmetros gerados pelo sistema de correlação de vórtices turbulentos, cujos dados foram utilizados neste trabalho.

Segundo OMETTO (1981), a transferência de energia junto à superfície do solo concorre para que ocorra o aparecimento de fluxos de calor, vapor d'água, CO_2, etc., e estes fluxos têm distribuição aleatória e casualizada em tempo e espaço, sendo, portanto, de características próprias ao processo de difusão turbulenta, que é um processo que pode ser descrito da seguinte forma: a energia líquida disponível à superfície do solo vai se transferir em parte, para as primeiras camadas de ar. Esse ar, que se situa imediatamente junto ao solo, torna-se mais energético, sofrendo uma variação em sua densidade. A densidade dessa parcela de ar diminui, variando seu volume e pressão, ocasionando um processo convectivo em micro-escala, isto é, aquela parcela mais energética tende a se elevar girando em torno de si mesma. Esse processo de transferência de energia é chamado de pseudocondução com maior ou menor intensidade de acordo com a energia líquida disponível à superfície. Essas

sucessivas trocas de densidade do ar próximo à superfície começam a dar origem ao processo de difusão turbulenta. Apesar de serem pequenos, os componentes verticais do movimento turbulento são de muita importância, desde que, condicionam o mecanismo de transporte de todas as propriedades do ar. A turbulência, por suas características aleatórias, atua nos três sentidos possíveis, ou seja, longitudinal, transversal e vertical. Os Fluxos de Calor Sensível e Latente, também são dados gerados pelo sistema de correlação de vórtices turbulentos.

Segundo OMETTO (1981), o Fluxo de Calor Sensível (*H*) utilizado para aquecer o ar atmosférico ocorre quando a radiação líquida disponível à superfície do solo ocasiona no ar atmosférico imediatamente ao contato com ela, uma transferência molecular de energia. No caso do ar atmosférico, esse transporte ocorre em uma camada de espessura extremamente reduzida em contato com a superfície do solo. Acima dessa camada laminar as moléculas mais energéticas do ar atmosférico tendem a se movimentar no sentido vertical em movimentos de baixa amplitude, provocando o que se chama de pseudocondução ou difusão turbulenta que são na realidade movimentos convectivos em pequena escala, desde que associados à diferença de densidade entre os limites da camada considerada.

O Fluxo de Calor Latente (*LE*) é o calor utilizado para a mudança de estado da água do líquido para o gasoso. Muitos autores consideram o Fluxo de Calor Latente como evapotranspiração. De acordo com OMETTO (1981) e PEREIRA et al. (2002) a evapotranspiração é o fenômeno associado à perda conjunta de água do solo pela evaporação da planta pela transpiração, predominantemente pelas folhas e da água interceptada pelo dossel.

Segundo HAYASHI (2001) existem diversos métodos para a determinação da evapotranspiração. Conforme TANNER (1968), os mais comuns são:

- Método do balanço hídrico, utilizando lisímetros e gravimetria;
- Método da correlação turbulenta, que associa o fluxo vertical do ar e o fluxo das propriedades associadas a ele;
- Método aerodinâmico, que determina os coeficientes de transferência através do perfil aerodinâmico do vento;
- Método do balanço de energia, que separa a energia líquida disponível em proporções dos diferentes processos;

- Métodos combinados, que combinam os processos do balanço de energia e aerodinâmico.

2.1.1. Método do Balanço de Energia

O Sol ocupa o centro do sistema planetário em que a Terra se encontra e que se denomina sistema solar. O Sol é a fonte primária de toda a energia disponível aos processos naturais ocorrentes na superfície da Terra (OMETTO, 1981).

A radiação solar atua diretamente sobre o desenvolvimento e o crescimento das plantas e indiretamente pelos efeitos no regime térmico de qualquer sistema terrestre (PEREIRA et al., 2002).

O balanço de energia representa a energia que entra no sistema - radiação de ondas curtas (*OC*) emitida pelo Sol - e a energia que sai do sistema - radiação de ondas longas (*OL*) emitida pela superfície terrestre.

HAYASHI (2001) diz que em condições diurnas de atmosfera normal, a principal fonte de onda curta (*OC*) é a radiação solar incidente, e o seu saldo (*BOC*) corresponde à radiação incidente (*OCi*) menos a radiação refletida (*OCr*):

$$BOC = OCi - OCr \quad (1)$$

ou

$$BOC = OCi\,(1 - r) \quad (2)$$

sendo *r* o albedo [1] da superfície.

O saldo de ondas longas (*BOL*) corresponde à radiação emitida pela atmosfera (*OLea*) menos a radiação emitida pela superfície (*OLes*):

$$BOL = OLea - OLes \quad (3)$$

[1] Razão entre a luz refletida por um objeto e a luz que incide sobre ele.

O saldo de radiação resultante é:

$$Rn = OCi\ (1 - r) + OLea - Olés \quad (4)$$

2.1.2. Método do Balanço de Energia pela Razão de Bowen

Este método é utilizado por muitos pesquisadores (FRITSCHEN e SIMPSON, 1989; BALDOCCHI et al., 1981; HARTMAN e GAY, 1981; VERMA e ROSENBERG, 1975; BISCOE et al., 1975; BROWN e ROSENBERG, 1971; DENMEAD, 1969; TANNER, 1960) para medir fluxos de calor sensível, vapor d'água e CO_2. Este método utiliza as relações de fluxo de gradiente e é baseado no balanço de energia da superfície.

Conforme PEREIRA et al. (1997) o saldo de radiação é utilizado pela superfície nos processos de evaporação como calor latente (*LE*), calor sensível (*H*) para aquecimento do ar, como calor do solo (*S*), estoque térmico do dossel (*G*) e na fotossíntese (*F*), sendo o processo fotossintético quantitativamente desprezível, pois utiliza apenas 3% do saldo de radiação (*Rn*), assim tem-se:

$$Rn + H + LE + S + G \approx 0 \quad (5)$$

Assumindo similaridade entre os coeficientes de troca turbulenta ($K_h = K_w = K_c = K_m = K$) e pelo uso da equação (5) e de *H* e *LE* dadas a seguir:

$$H = \rho C_p K_h \frac{\partial \overline{T}}{\partial z} \quad (6)$$

e,

$$LE = \rho \frac{\varepsilon}{P} \lambda K_w \frac{\partial \overline{e}}{\partial z} \quad (7)$$

a seguinte relação pode ser derivada:

$$K = \frac{-(Rn + S + G)}{\rho\left(C_p \frac{\partial \overline{T}}{\partial z} + \frac{\varepsilon}{P}\lambda \frac{\partial \overline{e}}{\partial z}\right)} \tag{8}$$

onde ε é a razão da massa molecular do vapor d'água e ar seco (ε = 0,622) e P é a pressão atmosférica.

Substituindo $K = K_h = K_w = K_c$ nas equações de *H*, *LE* e *Fc*, a seguir:

$$F_c = K_c \frac{\partial \overline{\rho_c}}{\partial z} \tag{9}$$

para obter os Fluxos de Calor Sensível, Calor Latente e CO_2, tem-se:

$$LE = -\frac{(Rn + S + G)}{1 + \beta} = -\frac{(Rn + S + G)}{1 + \gamma \frac{\Delta T}{\Delta e}} \tag{10}$$

BOWEN (1926) definiu a relação entre os Fluxos de Calor Sensível (*H*) e Calor Latente (*LE*), como forma de estudar a partição de energia disponível, sendo este método utilizado em vários trabalhos tais como HAYASHI (2001); CAMPELO JÚNIOR (1978) e VILLA NOVA (1973):

$$\beta = \text{Razão de Bowen} = \frac{H}{LE} \approx \gamma \frac{\Delta T}{\Delta e} \text{ (com } K_h = K_w\text{)} \tag{11}$$

De acordo com PEREIRA et al. (1997) tanto *LE* como *H* são negativos quando fluem da superfície para o ar e positivos quando fluem no sentido contrário. Para uma superfície evaporante, o sinal de β depende apenas do sinal de *H* e o valor de β negativo representa o transporte de calor sensível do ar mais quente para a superfície mais fria, condição de advecção ou de inversão térmica, nesse caso *LE* pode até suplantar *Rn*, pois *H* representa um adicional de energia disponível à superfície evaporante.

2.1.3. Métodos Micrometeorológicos

Estes métodos são utilizados para medir fluxos de massa e energia da superfície, tendo várias vantagens sobre as tradicionais técnicas de câmara.

VERMA (1990) explicita as seguintes vantagens do método micrometeorológico:

- Causam transtornos mínimos para o microambiente do ecossistema que está sendo estudado;
- Permitem medidas contínuas e prevêem integrais de área de fluxos;
- As medidas micrometeorológicas de tempos médios em um ponto providenciam uma integral de área, médias conjuntas de valores de troca entre a superfície e a atmosfera (BALDOCCHI et al., 1988).

De acordo com VERMA (1990), dentre os métodos micrometeorológicos para estimar fluxos de superfície, os métodos de correlação de vórtices turbulentos e balanço de energia pela Razão de Bowen (baseado em medidas de gradiente) são os dois mais fortemente empregados.

Os métodos micrometeorológicos são descritos a seguir:

2.1.3.1. Método de Correlação de Vórtices Turbulentos

Esse método providencia médias relativamente diretas dos fluxos medidos, sem a necessidade de suposições que consideram difusividade e sem fazer nenhuma suposição sob a natureza da cobertura da superfície (KANEMASU et al., 1979).

Neste método, o fluxo vertical de uma propriedade qualquer (ex. Fluxo de CO_2, Calor Latente ou Calor Sensível) transportada em um ponto é obtido pela correlação das flutuações na concentração daquela propriedade com as flutuações na velocidade vertical do vento. Por exemplo, os Fluxos de Calor Sensível (H), Calor Latente (LE) e CO_2 (Fc), sobre uma superfície homogênea horizontal sob condições de estado estáveis são dadas por:

Fluxo de Calor Sensível, $H = -\rho C_p \overline{w'T'}$ (12)

Fluxo de Calor Latente, $LE = -\lambda \overline{w' \rho v'}$ (13)

Fluxo de CO_2, $Fc = -\overline{w' \rho_c'}$ (14)

onde w é a velocidade vertical, T é a temperatura potencial do ar, ρv é a umidade absoluta, ρ_c é a concentração de CO_2, ρ é a densidade do ar, C_p é o calor específico do ar à pressão constante e λ é o calor latente de vaporização.

As medidas de correlação de vórtices turbulentos são geralmente feitas com sensores montados sob uma torre (VERMA et al., 1986 e 1989; HICKS et al., 1986; KANEMASU et al., 1979; WESELY et al., 1978; KAIMAL, 1975) ou também sob uma aeronave (LENSCHOW, 1986), que pode percorrer grandes áreas em um curto espaço de tempo. Medições de variações temporais contínuas em fluxos são difíceis devido à duração limitada do movimento, e as medidas realizadas a altura de aproximadamente 30 m da superfície do solo são evitadas por razão de segurança. Medidas em torres são particularmente apropriadas, por estudarem a variabilidade temporal dos fluxos.

2.1.3.2. Método Baseado em Gradiente

As relações entre os fluxos de gradiente têm sido usadas para estimar fluxos sob várias superfícies. Os Fluxos de Calor Sensível, Calor Latente, Fluxo de CO_2 e *Momentum* podem ser expressos como:

Fluxo de Calor Sensível, $H = \rho C_p K_h \frac{\partial \overline{T}}{\partial z}$ (15)

Fluxo de Calor Latente, $LE = \rho \frac{\varepsilon}{P} \lambda K_w \frac{\partial \overline{e}}{\partial z}$ (16)

Fluxo de CO_2, $Fc = K_c \frac{\partial \overline{\rho_c}}{\partial z}$ (17)

Fluxo de *Momentum*, $\tau = \rho K_m \frac{\partial \overline{U}}{\partial z}$ (18)

onde K_h, K_w, K_c e K_m são coeficientes de troca turbulenta (ou difusividade turbulenta) para Calor Sensível, Latente, CO_2 e *Momentum*, respectivamente; $\partial \overline{T} / \partial z$, $\partial \overline{e} / \partial z$, $\partial \overline{\rho_c} / \partial z$ e $\partial \overline{U} / \partial z$ são os gradientes médios verticais da temperatura (potencial) do ar, pressão de vapor, concentração de CO_2 e velocidade horizontal do vento; ε é a razão da massa molecular do vapor d'água e ar seco (ε = 0,622) e P é a pressão atmosférica.

Sob muitas superfícies rugosas (florestas), há grandes flutuações de difusividade e velocidade vertical, enquanto a concentração de gradientes verticais de temperatura, umidade e CO_2 apresentam correspondentemente pequenas flutuações. Nestas situações, o método de correlação de vórtices turbulentos seria preferível ao método baseado em gradiente (KANEMASU et al., 1979).

2.1.3.3. Método Aerodinâmico

Neste método, o coeficiente de troca turbulenta é obtido usando a equação do Fluxo de *Momentum* (18) e o perfil da velocidade do vento acima do dossel:

$$\frac{\partial \overline{U}}{\partial z} = \frac{u.}{k_z} \phi_m \quad (19)$$

onde $u. = (\tau/\rho)^{1/2}$; $k_z \cong$ 0,4 (constante de Von Karman) e ϕ_m é a dimensionalidade da função de cisalhamento do vento (função de estabilidade diabática):

$$k_m = k^2 z^2 \frac{\partial \overline{U}}{\partial z} \phi_m^{-2} \quad (20)$$

Substituindo a equação (20) nas equações (15), (16) e (17), tem-se:

$$H = \rho C_p k^2 z^2 \left(\frac{\partial \overline{U}}{\partial z}\right)\left(\frac{\partial \overline{T}}{\partial z}\right)\left(\phi_m{}^{-2}\right)\left(\frac{K_h}{K_m}\right) \quad (21)$$

$$LE = \rho \frac{\varepsilon}{P} \lambda k^2 z^2 \left(\frac{\partial \overline{U}}{\partial z}\right)\left(\frac{\partial \overline{T}}{\partial z}\right)\left(\phi_m{}^{-2}\right)\left(\frac{K_w}{K_m}\right) \quad (22)$$

$$Fc = k^2 z^2 \left(\frac{\partial \overline{U}}{\partial z}\right)\left(\frac{\partial \overline{\rho_c}}{\partial z}\right)\left(\phi_{m^{-2}}\right)\left(\frac{K_c}{K_m}\right) \quad (23)$$

onde $K_h = K_w = K_c$.

2.1.4. Fluxo de CO_2

O CO_2 é utilizado pela "planta" na realização dos processos fotossintéticos, sendo também liberado pelas raízes, pela decomposição da serrapilheira acumulada no solo e materiais orgânicos presentes nos rios e lagos, levados pela chuva. Um dos principais fatores de influência na liberação de CO_2 seria a temperatura, segundo alguns autores citados abaixo. A região de Sinop faz parte da Amazônia Legal, e apresenta diversos ecossistemas de interesse para compreender se a floresta Amazônica é um sumidouro ou uma fonte de CO_2, que pode provocar o aumento da temperatura média anual, que pode ser apenas regional ou também influenciar no aumento global.

VALENTINI et al. (2000) apresentaram dados das trocas líquidas de carbono de 15 ecossistemas europeus, confirmando que muitos desses ecossistemas atuam como sumidouros de carbono. Mostrando um significante aumento de carbono com decréscimo da latitude, embora a produção primária seja independente da latitude. Os estudos foram realizados por diferentes técnicas de estimativas indiretas de carbono: por meio de medidas de concentrações de CO_2, análise de isótopos, sensoriamento remoto, análise das tendências de crescimento e modelagem.

LLOYD e TAYLOR (1994) mostraram que a relação entre a respiração do solo e a temperatura pode ser representada por uma equação do tipo Arrhenius, quando a ativação efetiva de energia para respiração variar inversamente com a

temperatura, se a previsão do ciclo sazonal da produtividade líquida do ecossistema é muito sensível às relações assumidas de respiração *versus* temperatura. Para biomas em áreas onde a temperatura do solo é baixa, o valor da respiração do solo é relativamente mais sensível às flutuações na temperatura.

PARKIN e KASPAR (2003) em análises de séries temporais mostraram que as dinâmicas temporais do Fluxo de CO_2, foram mais próximas da temperatura do ar do que da temperatura do solo, talvez porque uma porção substancial do CO_2 originou-se de resíduos da superfície. O conhecimento da eficácia dos algoritmos de correções de temperatura e aplicações apropriadas das medidas de temperatura poderá melhorar a eficiência das estimativas do acúmulo do fluxo de carbono nas medidas de curto tempo.

Estudos apresentados por PARKIN e KASPAR (2003) mencionam que é grandemente reconhecido que a temperatura é um fator chave no controle do Fluxo de CO_2 e que mudanças sazonais foram relatadas de acordo com a mesma tendência de temperatura medida sazonalmente e, sob uma escala de tempo menor, mudanças diurnas no Fluxo de CO_2 têm sido observadas para temperatura do solo, apresentando fluxos máximos no meio da tarde e fluxos mínimos no final da manhã (AKINREMI et al., 1999).

Segundo GIARDINA e RYAN (2000), estudos sugerem que o aumento na temperatura pode acelerar a decomposição do carbono orgânico, contido em florestas, em mineral do solo e que o aquecimento global aumentará a liberação de carbono orgânico para a atmosfera.

PARKIN e KASPAR (2003) desenvolveram um trabalho em três componentes da bacia amazônica: floresta de terra firme, floresta inundada sazonalmente e rio permanente, identificando as incertezas no estoque de carbono por meio de artigos publicados que descrevem estes três ecossistemas. O fluxo de carbono residual encontrado nos rios foi menor do que RICHEY et al. (2002) sendo uma explicação possível que durante a noite o CO_2 – rico no ar do dossel da floresta - é drenado para o fundo de vales e para rios.

GRACE e MALHI (2002) alertaram para a matéria orgânica que é levada da terra para os rios e oceanos e liberam CO_2 para a atmosfera. Os autores mostraram que a água dos rios contém uma grande concentração de CO_2, passando para a

atmosfera em valores surpreendentes por unidade de área, comparáveis à respiração por organismos do solo e contribuindo substancialmente para fluxos de decomposição da bacia como um todo.

RICHEY et al. (2002) mostraram que quantidades significativas de carbono assimilado pela floresta já são certamente levadas para os rios e decompostos.

GRACE e MALHI (2002) utilizaram o método de estimativa de Fluxo de CO_2 empregado por RICHEY et al. (2002) descrito como: *"o método é o mesmo utilizado pelos oceanógrafos e é relativamente simples: o fluxo é calculado como a diferença na pressão parcial de CO_2 entre a água e a atmosfera, multiplicado por um coeficiente de troca. Espera-se por meio do cálculo, como usado por RICHEY et al. (2002) produzir uma estimativa conservativa do Fluxo de CO_2 sob condições de umidade porque o coeficiente de troca é determinado dentro de câmaras flutuantes, sem movimento normal de ar, então o fluxo verdadeiro pode certamente ser maior"*.

RAICH e POTTER (1995) em seu estudo sugerem que em escala global, o valor do Efluxo de CO_2 esteve correlacionado significativamente com a temperatura e a precipitação; e com acúmulo de carbono no solo e acúmulo de nitrogênio no solo não teve boa correlação. Os Fluxos de CO_2 têm um padrão sazonal pronunciado em muitos locais, com emissões máximas coincidindo com períodos de ativo crescimento das plantas.

Segundo CERRI et al. (2003) a conversão da floresta tropical para manejo agrícola tem implicações importantes para o acúmulo de carbono no solo e mudanças climáticas globais.

2.2. INCERTEZAS EM RELAÇÃO AO FLUXO DE CO_2

O ciclo do carbono (solo, ar e água) que fecha o balanço de carbono, ainda está em estudo, sendo muito difícil sua previsão. O uso de modelos matemáticos é uma das alternativas, pois existem muitas incertezas a este respeito dos métodos de estimativa de CO_2. Abaixo são citadas algumas incertezas de autores sobre este assunto.

LLOYD e TAYLOR (1994) concluíram que são necessárias mais informações antes de se fazer algumas previsões sobre mudanças no acúmulo de carbono no solo, em resposta a futuras mudanças de temperatura.

Para PARKIN e KASPAR (2003) o Fluxo de CO_2 do solo para a atmosfera é um importante componente do ciclo de carbono terrestre e as estimativas exatas de CO_2 são críticas na determinação do estoque de carbono. Estimativas exatas da perda de carbono diário de medições não freqüentes do Fluxo de CO_2 requerem caracterização da variabilidade temporal associada com estes processos. Estudos em laboratórios e no campo experimental tem resultado no desenvolvimento de relações matemáticas entre temperatura e respiração devido a que em laboratórios, geralmente, tem sido observado uma relação mais forte entre temperatura e produção de CO_2 do que em estudos de campo.

DAVIDSON et al. (2000) relataram uma relação diurna significante em um local de atividade pastoril, mas não observaram relações significantes de temperatura e Fluxo de CO_2 em uma floresta primária ou um lugar de pastagem degradada.

JENSEN et al. (1996) observaram que o Fluxo de CO_2 diurno não apresentou correlação significativa com a temperatura do solo a 5 cm.

GRACE e MALHI (2002) reconheceram que a floresta exporta carbono para as águas que se decompõe e é liberado como CO_2. Estes resultados podem explicar incertezas de estudos do ciclo e estoque de carbono, na Amazônia e em escala global. Espera-se que a fertilização originada do aumento dos níveis de CO_2 na atmosfera intensifique a liberação de carbono com a fotossíntese excedendo a respiração, visto que tanto nas estimativas quanto medições "*in situ*", que este efeito será menor para florestas maduras. Se o grande valor do acúmulo de CO_2 for aplicado para o total da bacia, serão levados a concluir que a Amazônia é um grande sumidouro de carbono, talvez absorvendo dois terços das emissões de combustíveis fósseis do mundo. Isto parece improvável e não consiste com quaisquer análises de inventários da floresta ou estudos da atmosfera global, que sugerem que o sumidouro amazônico é muito menor.

Estudos de ciclo de carbono na água têm grande importância para o esclarecimento de dúvidas sobre estimativas de CO_2 realizadas em florestas por medições "*in situ*". RICHEY et al. (2002) indicaram que as torres de correlação de vórtices turbulentos (*eddy covariance*) situadas nas florestas, não dariam um quadro verdadeiro da decomposição total.

Segundo RICHEY et al. (2002) estimativas da magnitude do seqüestro de carbono são incertas, contudo, dependentes se são derivadas de medidas de fluxos de gás sobre florestas, ou o acúmulo de biomassa na vegetação e solos. É também possível que erros metodológicos possam superestimar valores da liberação de carbono ou que outros processos de perda ainda tenham que ser identificados.

SALESKA et al. (2003) estudaram ecossistemas próximos a Santarém, Brasil, concluindo que o carbono foi liberado na estação chuvosa e absorvido na estação seca, o que foi oposto aos ciclos sazonais do crescimento das árvores e das previsões de modelos. Observações biométricas confirmaram a perda líquida, mas podendo significar um efeito transitório de perturbações recentes, superpostas no balanço de carbono em longo prazo. Dado que perturbações episódicas são características de florestas maduras, seria provável que seu seqüestro de carbono fosse menor do que tem sido inferido por estudos recentes de correlação de vórtices turbulentos em ecossistemas não perturbados.

MUNHOVEN (2002) fez um estudo com dois modelos de tempo continental: o modelo de tempo de Gibbs e Kump (GKWM) e uma versão adaptada do modelo de erosão global de Amiotte Suchet e Probst para consumo de CO_2 (GEM-CO_2), mostrando as estimativas para a variação glacial e interglacial dos valores de consumo de CO_2 e produção de HCO_3^- (carbonato), e concluiu que a grande variabilidade nas mudanças obtidas com cada modelo temporal foi, primeiramente, devido à variabilidade nos resultados do Modelo de Circulação Global (GCM).

2.2.1. Modelos Computacionais de Simulação de Mudanças Climáticas

Os estudos feitos na Amazônia e em ecossistemas de outros países, para prever o que o aumento dos gases de efeito estufa, principalmente o CO_2, poderá provocar ao longo do tempo apresentam estimativas com incertezas do que acontecerá com o clima regional e global. Para se ter uma idéia de como as mudanças no uso da terra e as emissões de gases de efeito estufa (GEE) afetarão o clima do planeta são usados modelos computacionais de simulação do clima. Artigos de modelagem explicando como ocorre a interação das variáveis climáticas devem ser levados em conta, e são citados nesta seção.

NOBRE (2001) explicou que modelos climáticos globais nada mais são do que longos programas de computador (código computacional) onde se resolvem, numericamente, aproximações das equações matemáticas que representam as Leis Físicas (leis de conservação da quantidade de movimento, de massa, de energia, de água na atmosfera e de sal no oceano, lei do gás ideal para a atmosfera). Estas leis regem os movimentos na atmosfera e as correntes nos oceanos, a interação entre estes dois fluidos e a interação da atmosfera com a vegetação. O autor mostrou que os modelos climáticos computacionais sugerem que o clima do planeta Terra poderá alterar-se significativamente neste século, se as emissões dos gases do efeito estufa continuar a crescer. No caso do Brasil, se as emissões continuarem a crescer, os vários cenários de mudanças climáticas indicaram aquecimento de 4 a 6 ºC em partes do país, principalmente na Amazônia, ao final do século. Há, ainda, muita incerteza com relação às possíveis mudanças na precipitação pluviométrica e quanto às modificações na freqüência de extremos climáticos (por exemplo, secas, inundações,

geadas, tempestades severas, vendavais, granizo, etc.). Desmatamentos na Amazônia também podem causar mudanças climáticas regionais, com aumento da temperatura e redução de precipitação.

SANTOS e COSTA (2001) utilizaram o Modelo SITE (Simple Tropical Ecosystem Model) que tem como dados de entrada 7 variáveis: a radiação solar incidente, o albedo, a radiação infravermelha incidente, temperatura e umidade do ar, precipitação e velocidade horizontal do vento, com a finalidade principal de simular os fluxos de massa e energia entre o ecossistema e a atmosfera. Os autores realizaram este estudo em uma Floresta Tropical Amazônica e concluíram que para se reproduzir corretamente o fluxo horário de CO_2, deve-se incorporar conceitos de fisiologia vegetal e microbiologia de solos em modelos micrometeorológicos.

O Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC), concluiu um estudo sobre cenários de emissões de gases de efeito estufa (GEE), com base neste estudo e nos resultados de 11 simulações com modelos climáticos globais cobrindo o período de 1870 a 2100, foram elaborados cenários de alterações climáticas para o norte e o sul da América do Sul (CARTER e HULME, 2000).

JOOS et al. (2001) analisaram um modelo climático que une Física e Biogeoquímica e um modelo global de dinâmica de vegetação e a representação de um modelo de circulação geral que une atmosfera e oceano, desenvolvido pelo Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC) sugerindo que até 2100, o CO_2 atmosférico aumentará para 540 ppm para o menor cenário de emissão analisado e para 960 ppm para o maior cenário de emissão analisado.

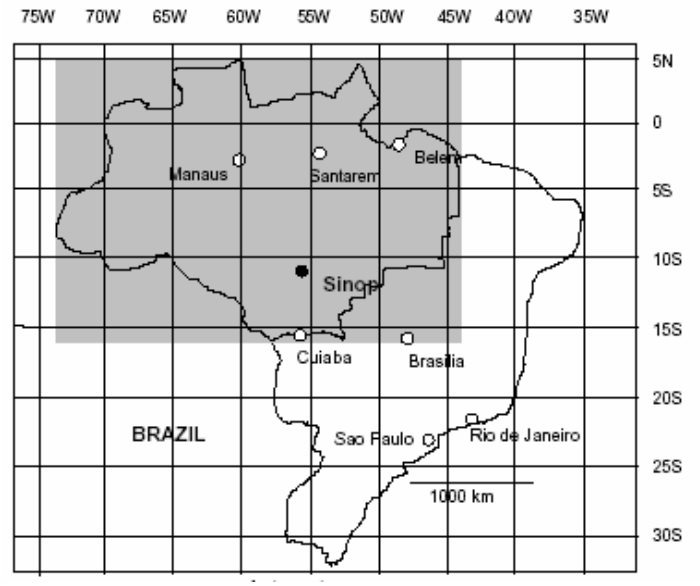
ROCHA et al. (1996) descreveram um método de calibração do modelo SiB2, que estima trocas de vapor d'água e CO_2 e utiliza como dados de entrada 6 variáveis: radiação solar global, radiação líquida, temperatura e umidade do ar, concentração de CO_2 e precipitação. Este estudo foi conduzido em três sítios de Floresta Tropical Amazônica: Reserva Ducke, Reserva Biológica do Jaru e Reserva do Vale do Rio Doce.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

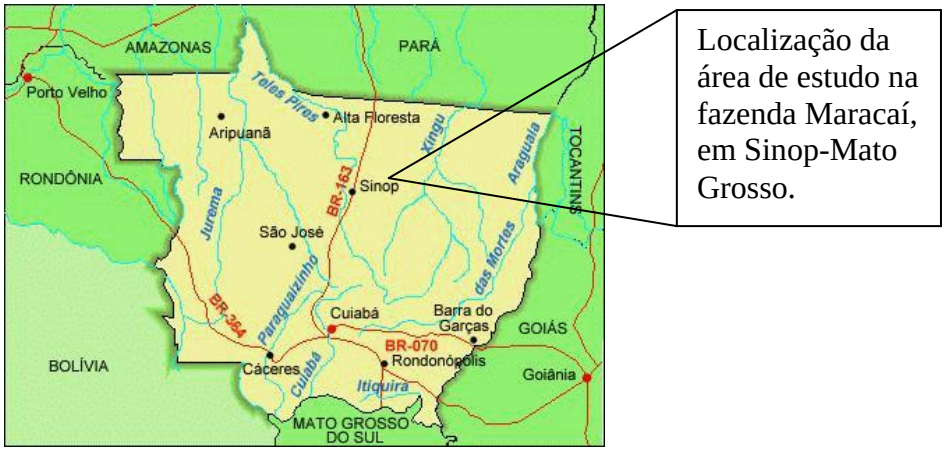
O presente estudo foi desenvolvido na Amazônia Legal, em uma área pertencente à Fazenda Maracaí, com cerca de 20 km^2, localizada na Região Centro-Oeste, a aproximadamente 50 km no noroeste de Sinop, Mato Grosso, Brasil (11°24.75'S; 55°19.50'O), em uma Floresta de Transição (figuras 1 e 2) onde está instalada uma torre metálica com equipamentos de coletas de dados micrometeorológicos (figura 3), pertencente ao projeto Experimento de Grande Escala da Biosfera Atmosfera na Amazônia (LBA).

Foram analisados neste estudo os Fluxos de CO_2, Calor Latente (*LE*) e Calor Sensível (*H*) com dados dos anos de 1999 a 2003.



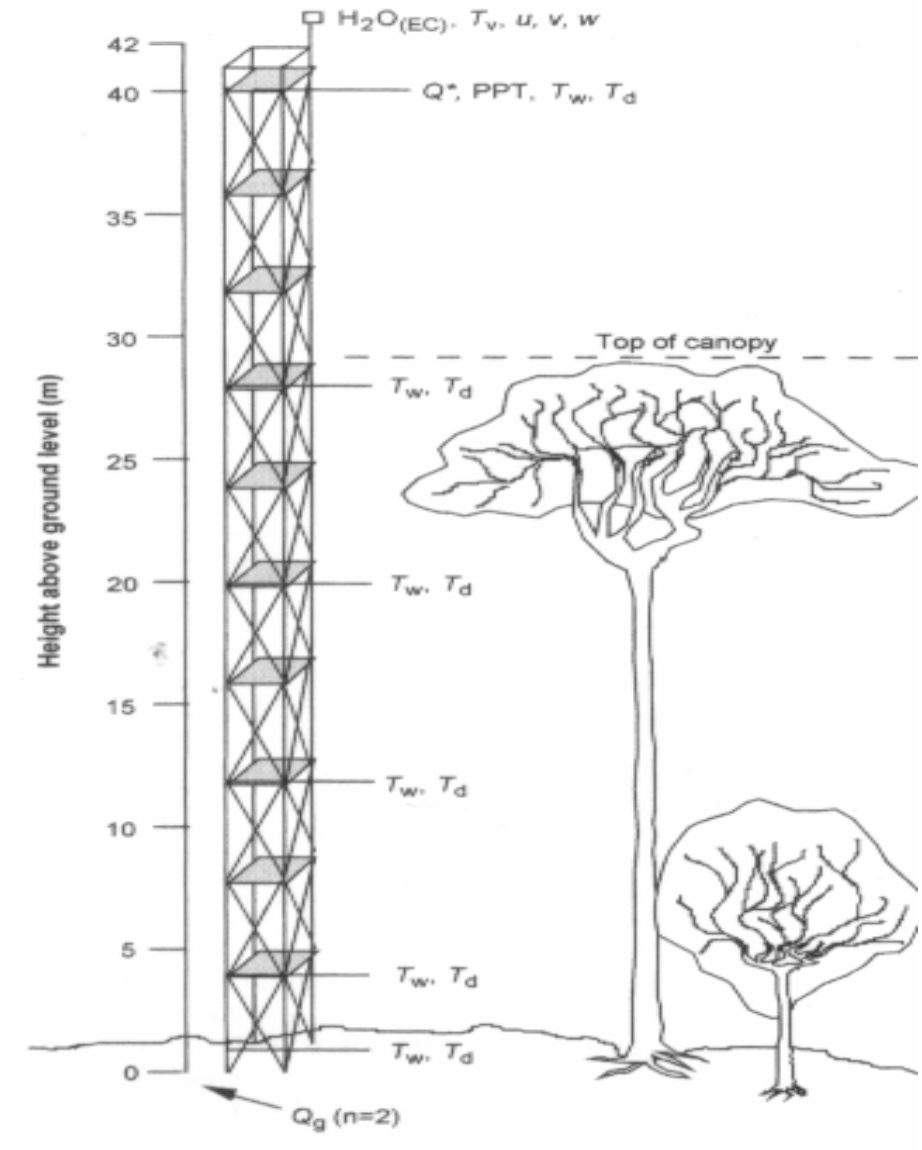
Fonte: VOURLITIS et al. (2001).

Figura 1. Mapa do Brasil, com as coordenadas do local de estudo.



Fonte: IBGE (2000).

Figura 2. Mapa do Estado de Mato Grosso.



Fonte: VOURLITIS et al. (2002).

Figura 3. Esquema do sistema de medições micrometeorológicas de correlação de vórtices turbulentos (ou *eddy covariance*).

3.1.1. Vegetação e Clima

A área de estudo é constituída por uma Floresta Tropical de Transição, entre os dois maiores tipos de ecossistemas da América do Sul, no ecótono entre a Floresta Amazônica (Floresta Tropical Úmida) e o Cerrado (figura 2). O terreno próximo à torre é geralmente plano, com um dossel contínuo, composto de árvores de 28 a 30 m de altura, aproximadamente. O solo é bastante arenoso e as espécies com mais abundância no local são *Tovomita sp*, *Brosimum sp*, *Casearia sp*, *Qualea sp*,

Vochysia sp, Ocotea spixiana, Dinizia excelsa, Quina pteridophilla, Mezilaurus itauba (VOURLITIS et al., 2002).

O clima da região é tropical quente e úmido. A temperatura média anual é de 24,0 °C, e a média de chuva é 2000 mm/ano (MIRANDA et al., 2004). Aproximadamente metade da precipitação acumulada anualmente ocorre entre Dezembro e Fevereiro, enquanto que cerca de 1% ocorre historicamente, entre Junho e Agosto (PRIANTE FILHO et al., 2004), conforme pode ser visto na tabela 1.

Tabela 1. Precipitação mensal para a área em estudo.

Mês	Precipitação (mm)			
	2000	2001	2002	2003
Janeiro	359	366	388	600
Fevereiro	388	165	334	271
Março	434	255	326	382
Abril	143	0	23	276
Maio	0	0	0	70
Junho	0	0	0	0
Julho	0	0	0	0
Agosto	0	5	0	0
Setembro	90	177	62	25
Outubro	82	189	172	273
Novembro	253	365	218	383
Dezembro	250	484	338	365

Fonte: Estação meteorológica Fazenda Continental.

3.1.2. Instrumentos Micrometeorológicos

Os sensores de correlação de vórtices turbulentos foram montados a uma altura de 42 m acima do nível do solo ou 12-14 m acima do nível do dossel da floresta, que mostra o esquema do sistema de medições micrometeorológicas de correlação de vórtices turbulentos (*eddy covariance*), usado para medir o Fluxo de Calor Latente (*LE*) e Sensível da Floresta Tropical de Transição, próxima a Sinop-MT. A figura 3 mostra a localização dos medidores de temperatura de bulbo úmido (T_w) e bulbo seco (T_d), radiômetro líquido (Q^*), pluviômetro coletor de chuva (*PPT*) e termopares para fluxo de calor no solo.

O sistema de correlação de vórtices turbulentos utilizou um sistema anemômetro-termômetro sônico em três dimensões (SWS-211/3K, *applied technologies, Inc. Boulder,* Colorado) e um analisador de gás infravermelho de caminho aberto (NOAA-ATDD, *Oak Ridge,* Tenesse), para mensurar a média e as flutuações da velocidade do vento, temperatura e vapor d'água.

Os equipamentos utilizados para medidas de concentração de CO_2 instalados na altura da torre foram:

- Analisador de gás (CO_2 e H_2O) de circuito aberto, Modelo LI-7500/LI-COR, *Inc. Lincoln, NE, USA.* Este equipamento localiza-se no topo da torre, a aproximadamente 44 m na mesma haste do anemômetro sônico. A análise, feita por este equipamento, foi através de infravermelho e mediu, também, temperatura e umidade do ar. Os dados deste equipamento foram enviados para um *data packer* e, depois, enviados em forma de "pacote de dados" para um *Palm top* (HP 200LX), que armazenou no cartão PCMCIA de 256 MB na altura de 42 m.
- Analisador de gás (CO_2 e H_2O) de circuito fechado, Modelo LI-820/ LI-COR, *Inc. Lincoln, NE, USA.* Este equipamento localiza-se a uma altura de 10 m. O gás foi bombeado através de uma válvula solenóide, que sugou o ar de canos instalados em diferentes alturas da torre 1, 4, 12, 20 e 28 m acima do solo, mediu também temperatura e umidade do ar. Os dados coletados foram enviados para um datalogger modelo CR10X da *Campbell Scientific Inc*., o qual armazenou os dados.

3.2. METODOLOGIA

3.2.1. MÉTODO DE ANÁLISE

Para análise dos dados foi utilizado o apêndice 4 do livro "*Exploring Complexity*" de NICOLIS e PRIGOGINE (1998), que apresenta um método para a análise de séries temporais, tendo como base a Teoria da Complexidade. Tal método permite avaliar, a partir da análise dos dados de uma única variável, obtidos ao longo do tempo, de quantas outras variáveis esta dependeria, bem como do grau de complexidade associado àquela variável. Por "grau de complexidade", entende-se o estabelecimento de uma medida quantitativa para a variabilidade da grandeza em questão, ou seja, se essa grandeza é estável no sentido de variar pouco ao longo do tempo ou muito variável. Essa medida está associada também com o grau de estabilidade do ecossistema.

Em geral, os sistemas físicos apresentam estabilidade quando os valores das variáveis pertinentes, no espaço de fase[2], encontram-se distribuídos em torno de uma curva ou superfície bem definida. Tal curva ou superfície é chamada "atrator". Os estudos de estabilidade e variabilidade de sistemas complexos (RUELLE, 1993) têm apontado que a determinação da dimensão dos atratores é uma informação importante para a compreensão da sua dinâmica. Por exemplo, pêndulos ou osciladores ideais (sem atrito) possuem atratores de ordem 2 (bidimensionais), definidos por duas variáveis (posição e velocidade); o movimento de translação de um planeta numa órbita elíptica que apresenta precessão apresenta atrator de ordem 3. Contudo, nem sempre a dimensionalidade do atrator corresponde a um número inteiro. Atratores com dimensionalidade fracionária são possíveis para sistemas complexos[3]: Tratam-se dos chamados atratores fractais (RUELLE, 1993).

O método de análise aqui empregado permite investigar se existe algum atrator correspondente aos dados e, também, a dimensionalidade desse atrator. Tal análise é importante para a área de investigação desse trabalho porque, além de ser inédito, para a modelagem das variáveis pertinentes ao estudo da interação atmosfera-biosfera, a determinação de quantas variáveis são necessárias para descrever um

[2] Ou seja, no espaço constituído pelas próprias variáveis.
[3] Sistemas dependentes de muitas variáveis, tais como os ecossistemas.

sistema é um ponto de fundamental importância para o estabelecimento de modelos teóricos. Além disso, o estudo dos atratores também é importante para a compreensão de regularidades apresentadas pelas variáveis estudadas neste trabalho.

3.2.1.1. Atratores

A teoria da complexidade é um novo conjunto de idéias relacionadas com ordem, evolução, sistemas sociais e aprendizagem, que emergiu na segunda metade do século XX. Concebida com o concurso de instrumentos poderosos, como a modelagem e simulação computacionais e engajando matemáticos, biólogos, físicos, sociólogos e economistas, a teoria da complexidade se apresenta hoje, ainda, como geradora de intensos debates nos meios científicos (HORGAN, 1995).

Ilya Prigogine, prêmio Nobel de Química em 1977, sempre se sentiu incomodado pela contradição entre a segunda lei da termodinâmica - que afirmava estar o universo movendo-se rumo à desordem crescente - e a evidência da evolução, que indicava que pelo menos uma parte do universo incrementava sua ordem e estrutura: "*Enquanto que algumas partes do universo podem operar como máquinas, estas são sempre sistemas fechados e os sistemas fechados formam somente uma pequena parte do universo físico. A maior parte dos fenômenos de interesse são, na realidade, sistemas abertos, trocando energia, matéria ou informação com o seu ambiente*" (PRIGOGINE e STENGERS, 1984). Estes autores, afirmam que os sistemas em desequilíbrio podem produzir novas estruturas espontaneamente por meio de um processo de *auto-organização*. Exemplos de tais sistemas seriam redemoinhos, ciclones e o processo de cristalização. Estes sistemas retiram energia de seu ambiente e, produzindo ordem, dissipam a entropia. Denominaram tais sistemas de *estruturas dissipativas*. Uma estrutura dissipativa captura energia e exibe ordem. Esta é uma característica de muitos sistemas no universo, em particular das formas de vida. Essa inspiração segundo a qual sistemas abertos evoluem e somente sistemas fechados se movem rumo à entropia conseguiu reconciliar a teoria da evolução com a segunda lei da termodinâmica.

De acordo com NICOLIS e PRIGOGINE (1998) em todos os sistemas onde a dinâmica é redutível a uma ou duas dimensões do espaço de fase, o comportamento é

severamente limitado pela condição topológica imposta por algum movimento de baixa dimensão, havendo a possibilidade da existência de *atratores*, ou seja, **regiões no espaço de fase onde os dados analisados são encontrados com maior freqüência**. Dependendo da dinâmica do sistema estudado, diferentes tipos de atratores são possíveis, conforme descrito a seguir pelos autores:

Na figura 4 são mostradas curvas no espaço de fase constituídas por pontos correspondentes aos valores de variáveis pertinentes a um sistema hipotético. Cada ponto nessas curvas corresponde a um instante de tempo diferente. Em (a) observa-se uma curva aberta (caso de ausência de atrator) e uma curva fechada simples, correspondente a um atrator de ordem 1. Em (b) tem-se uma curva fechada dupla, sugerindo um atrator de ordem 2. Uma característica importante dos pontos pertencentes a um atrator é que os dados ao longo do tempo (x_1, x_2, etc.) estão relacionados por uma relação matemática (f), que em princípio é desconhecida, equação (24):

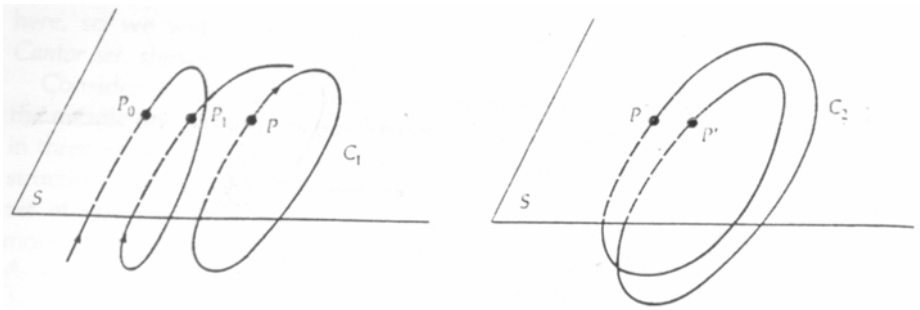
$$X_{n+1} = f(x_n, y_n) \tag{24}$$

$$Y_{n+1} = g(x_n, y_n) \tag{25}$$

$$x_{n+1} = f(x_n) \tag{26}$$

ou, se houverem duas variáveis:

$$x = f(x,y),\ y = g(x,y) \tag{27}$$



(a) (b)

Figura 4. Convergência das trajetórias de um sistema de tempo dinâmico contínuo. (a) Ciclo de ordem 1. (b) Ciclo de ordem 2.

Mesmo que haja mais que duas variáveis, pode-se imaginar uma superfície plana bidimensional no espaço de fase, a “superfície de Poincaré” (GLEICK, 1991). Normalmente, é possível encontrar alguma regularidade estudando-se os pontos que cruzam essa superfície, conforme destacado na figura 4.

3.2.1.2. Atratores Quase Periódicos: Toróides Invariáveis

Uma outra topologia permitida é sugerida pela figura 5.

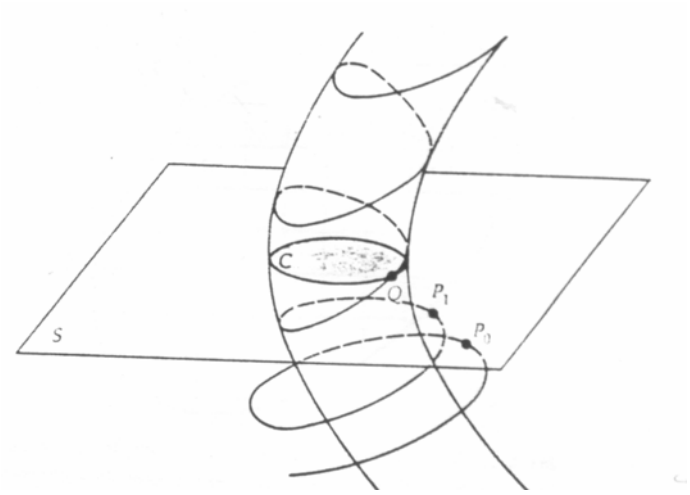


Figura 5. Atrator toroidal, com uma curva fechada (*C*) correspondente à intersecção com uma superfície de Poincaré.

Os pontos de intersecção P_0, P_1, . . . (correspondentes ao cruzamento do atrator hipotético com a superfície de Poincaré) convergem para uma curva fechada

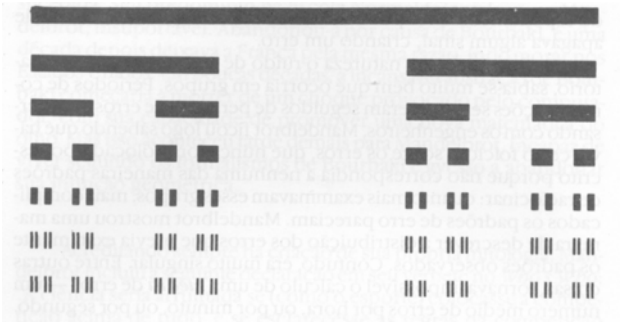
C. Nesse caso, o objeto atrativo, correspondente no espaço de fase em três dimensões, é uma superfície bi-dimensional.

Contudo, quando uma série temporal de valores de variáveis no espaço de fase se distribui numa configuração próxima de um toróide, o comportamento desse conjunto de variáveis é quase periódico, ou seja, os dados não se distribuem ao longo de uma curva fechada, mas aberta. O novo elemento aqui, é que o toróide está atraindo, contrário ao caso dos sistemas conservativos, em que há toróides contínuos ao redor de uma órbita periódica. Em outras palavras, um atrator toróide invariável é o modelo natural de reproduzir fenômenos quase periódicos observados na natureza.

3.2.1.3. Atratores Não Periódicos: Fractais

Podem existir outros atratores, que fixem pontos, curvas fechadas, superfícies limitadas de duas dimensões, em um espaço de fase tri-dimensional?

Segundo NICOLIS e PRIGOGINE (1998) primeiro, um atrator pode ter uma dimensionalidade menor do que seu espaço de fase, desde que ele represente um conjunto de estados que permanece invariável sob as dinâmicas. Em conseqüência disso, a questão eleva-se à pergunta se existem objetos que a dimensionalidade está entre aquela de um ponto e uma linha, de uma linha e uma superfície, ou mesmo de uma superfície e um volume. Objetos semelhantes, se eles existem, não seriam pontos, nem curvas, nem superfícies, nem – expressão mais generalizada – cópias topológicas. O matemático francês Benoit Mandelbrot inventou o nome fractais para eles. A análise dos números, que é geralmente considerada uma das mais difíceis áreas da matemática, revê certas possibilidades, desde que a raiz da questão acima possa ser reduzida ao seguinte: existem conjuntos que são intermediários entre um conjunto numerável assim como números naturais, e uma continuidade como pontos sobre uma linha? A resposta para esta questão é sim, e é intimamente relatada com a noção de infinitésimo. Foi arranjado pelo matemático alemão Georg Cantor, aqui ilustrando os resultados com um exemplo particular conhecido como o conjunto de Cantor.



Fonte: JAMES GLEICK (1991).

Figura 6. Construção do conjunto de Cantor (ou a poeira de Cantor). Seções sombreadas têm as porções do centro eliminadas em partições sucessivas dos segmentos de linha dentro da terça parte.

De acordo com os autores, considerando o segmento fechado [0,1], dividindo-o em três partes iguais e retirando o seu terço médio, a seguir, dividindo cada um dos segmentos remanescentes em três partes iguais e novamente retirando o terço médio destes, e assim por diante. Pela construção, o conjunto de pontos obtidos em um limite está em um infinito, conjunto não enumerável de pontos desconectados. Ele não tem comprimento intrínseco (é de medida zero, em muitos termos técnicos), uma vez que o comprimento de seus complementos seja igual a um:

$$\frac{1}{3}+\frac{2}{9}+\frac{4}{27}+...=1$$

Chamando *D* qualquer conjunto que pode ser de interesse, e tentando cobri-lo pelos segmentos ou quadrados, ou mais geralmente hipercubos[4] de lado ε. Observe então que a dimensão *d* de todos os múltiplos topológicos bem conhecidos é derivada da seguinte relação:

$$d=\lim_{c\to 0}\frac{\ln N_{\varepsilon}}{\ln 1/\varepsilon} \qquad (28)$$

[4] Figura com mais de uma dimensão.

O conceito está ilustrado na figura 7.

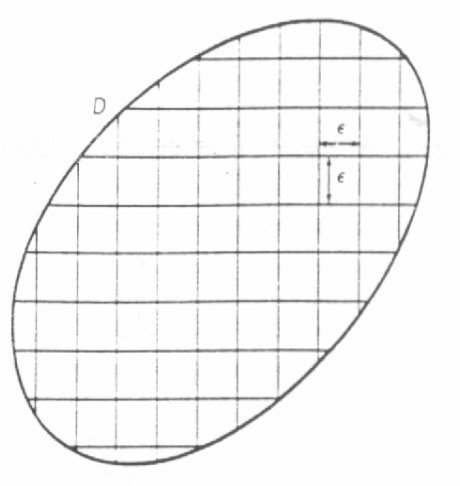


Figura 7. Ilustração do conceito de dimensionalidade *d*, de um conjunto *D*.

Encontram-se células de lado ε característicos; contando o mínimo número de células *N* necessárias para cobrir *D*; dividindo o logaritmo de *N* pelo logaritmo de $1/\varepsilon$ e elevando-se ao limite de um ε muito pequeno, obtém-se *d*, a dimensionalidade de *D*. Aplicando isto para o plano, especificamente um quadrado de lado 1, necessita-se de $(1/\varepsilon)^2$ quadrado do lado ε para cobrir este espaço, conseqüentemente

$$d = \frac{\ln\left(\frac{1}{\varepsilon}\right)^2}{\ln\frac{1}{\varepsilon}} = 2\frac{\ln\frac{1}{\varepsilon}}{\ln\frac{1}{\varepsilon}}; \qquad (29)$$

isto é, $d = 2$ como esperado.

Estendendo-se esse conceito para o conjunto de Cantor obtêm-se na primeira partição do intervalo, dois segmentos de comprimento 1/3 suficientes para descrever todos os subconjuntos presentes. Na segunda partição, contudo, são necessários quatro segmentos de comprimento 1/9, e, na enésima partição são necessários 2^n segmentos de comprimento $1/3^n$.

então,

$$\frac{\ln N_{\varepsilon}}{\ln \frac{1}{\varepsilon}} = \frac{\ln 2^n}{\ln 3^n} = \left(\frac{n \ln 2}{n \ln 3} \right), \tag{30}$$

ou,

$$d_{Cantor} = \frac{\ln 2}{\ln 3} \cong 0{,}63$$

O conjunto de Cantor é assim neste aspecto intermediário entre um ponto, quando $d = 0$ e uma reta, quando $d = 1$: ou seja, ele é um objeto fractal. O objeto correspondente no espaço tri-dimensional consiste de um infinito de pedaços dobrados semelhantes aos pedaços de um conjunto de Cantor. Pode-se, então, questionar sobre a dimensionalidade dos atratores correspondentes às variáveis microclimáticas dos ecossistemas.

3.2.2. Método Utilizado no Trabalho

O método proposto por NICOLIS e PRIGOGINE (1998), no apêndice 4, do livro "*Exploring Complexity: an Introduction*", cujo título traduzido ao Português é "*Reconstrução das Dinâmicas de Sistemas Complexos de Séries de Dados Temporais. Aplicação para Variabilidade Climática*", serviu de base para o presente trabalho, e é descrito a seguir:

Seja $X_0(t)$ a variável em questão, que possui uma série de valores distribuídos ao longo do tempo. Seja $\{X_0(t_i)\}$ a série temporal correspondente $\{X_0(t_1),\ldots, X_0(t_N)\}$ constituída por N dados. A partir desses dados, constroem-se outras séries temporais com os mesmos dados, mas começando com uma defasagem temporal τ, conduzindo ao seguinte conjunto de variáveis discretizadas:

$X_0(t)$: $X_0(t_1),\ldots X_0(t_N)$
$X_1(t)$: $X_0(t_1+\tau),\ldots,X_0(t_N+\tau)$

.
.
.

X_{n-1}: $X_0\,[t_1 + (n-1)\,\tau],\ldots, X_0\,[t_N + (n-1)\,\tau]$ (31)

Esse conjunto de séries temporais, obtido a partir de uma única variável, formaria um espaço de fase de dimensão *n*.

Introduzindo uma notação vetorial X_i sustentada por um espaço de fase cujas coordenadas são $\{X_0\ [t_1 + (n\text{-}1)\ \tau]$,..., $X_0\ [t_N + (n\text{-}1)\ \tau]\}$ e escolhendo um ponto de referência X_i destes dados, pode-se calcular todas as suas distâncias $[X_i - X_j]$ dos N-1 pontos remanescentes em relação ao ponto escolhido. Isto permite calcular os pontos que estão dentro de uma distância fixa, *r*, do ponto X_i no espaço de fase, através da seguinte função:

$$C(r) = \frac{1}{N^2} \sum_{i,j=1, i \neq j}^{N} \theta(r - \left\| X_i - X_j \right\|) \qquad (32)$$

onde:

θ é a função de Heaviside (BASSANEZZI e FERREIRA JR., 1988), definida como:

$\theta(x) = 0$, se $x < 0$ e $\theta(x) = 1$ se $x > 0$;

r é uma variável que representa o raio de uma hipercircunferência no espaço de fase (figura 8), sendo $C(r)$ uma medida de quantos pontos estariam no seu interior.

O método prevê que se escolha um conjunto de valores de *r* e se calcule os valores de $C(r)$ correspondentes.

$C(r)$ pode assim ser referido como uma integral da *função de correlação* do atrator. Matematicamente essa função mede o grau de correlação entre os pontos X_i.

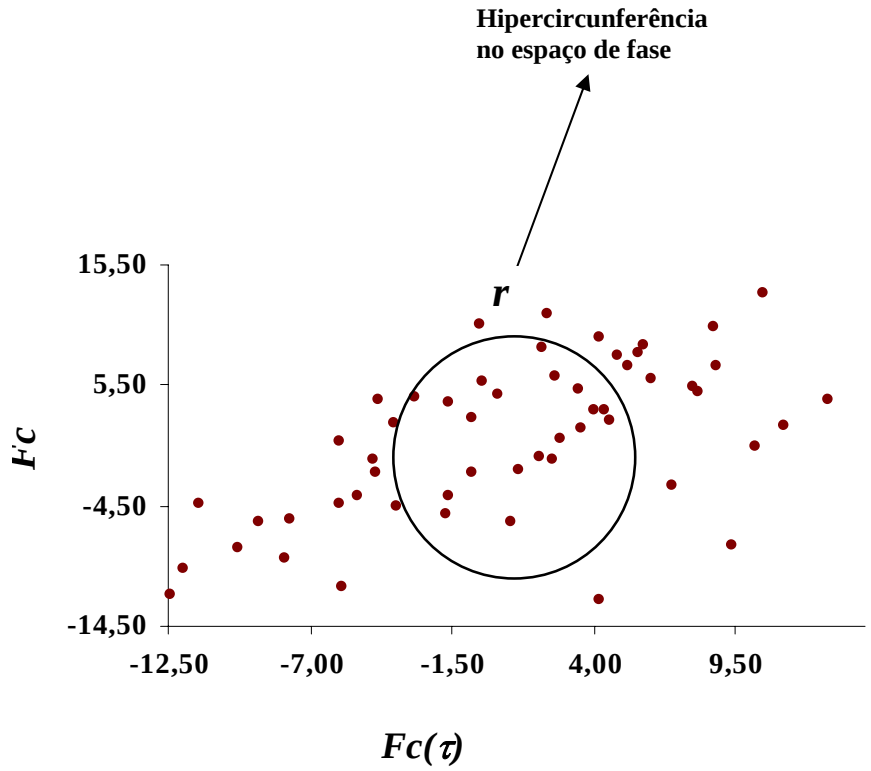


Figura 8. Espaço de fase dos dados de *Fc*, para Jan/01 e *n* = 2, com uma circunferência de raio *r* para avaliação do grau de correlação dos dados.

O método desenvolvido por NICOLIS e PRIGOGINE (1998) prevê o cálculo de *C*(*r*) para diferentes dimensionalidades, ou seja, primeiro considerando duas séries, X_0 e X_1 (dimensionalidade dois), depois três, X_0, X_1 e X_2 (dimensionalidade três), e assim sucessivamente, conforme mostrado na tabela 2. Em cada caso, a expressão para a norma de *Xi* – *Xj* é:

Para *n* = 2

$$\left\| X_i - X_j \right\| = \sqrt{(X_0(t_i) - (X_0 t_j))^2 + (X_0(t_i + \tau) - X_0(t_j + \tau))^2} \qquad (33)$$

Para *n* = 3

$$\left\| X_i - X_j \right\| = \sqrt{[X_0(t_i) - (X_0 t_j)]^2 + [X_0(t_i + \tau) - X_0(t_j + \tau)]^2 + [X_0(t_i + 2\tau) - X_0(t_j + 2\tau)]^2} \qquad (34)$$

Para *n* = 4, . . ., etc.

Tabela 2. Conjunto de dados extraídos da planilha eletrônica do Microsoft Excel, para τ = 30 minutos e n = 7.

Tempo (*h*)	***Fc***	***Fc* (τ)**	***Fc* (2τ)**	***Fc* (3τ)**	***Fc* (4τ)**	***Fc* (5τ)**	***Fc* (6τ)**
0:00	15,40	2,40	-0,71	2,76	1,10	-1,66	4,03
0:30	2,40	-0,71	2,76	1,10	-1,66	4,03	3,52
1:00	-0,71	2,76	1,10	-1,66	4,03	3,52	1,93
1:30	2,76	1,10	-1,66	4,03	3,52	1,93	-0,46
2:00	1,10	-1,66	4,03	3,52	1,93	-0,46	10,55
2:30	-1,66	4,03	3,52	1,93	-0,46	10,55	13,05
3:00	4,03	3,52	1,93	-0,46	10,55	13,05	4,19
3:30	3,52	1,93	-0,46	10,55	13,05	4,19	9,41
4:00	1,93	-0,46	10,55	13,05	4,19	9,41	-7,79
4:30	-0,46	10,55	13,05	4,19	9,41	-7,79	-5,74
5:00	10,55	13,05	4,19	9,41	-7,79	-5,74	-11,28
5:30	13,05	4,19	9,41	-7,79	-5,74	-11,28	-4,39
6:00	4,19	9,41	-7,79	-5,74	-11,28	-4,39	4,23
6:30	9,41	-7,79	-5,74	-11,28	-4,39	4,23	-12,43
7:00	-7,79	-5,74	-11,28	-4,39	4,23	-12,43	-11,87
7:30	-5,74	-11,28	-4,39	4,23	-12,43	-11,87	-9,75
8:00	-11,28	-4,39	4,23	-12,43	-11,87	-9,75	-7,94
8:30	-4,39	4,23	-12,43	-11,87	-9,75	-7,94	-9,00

A equação (35) mostra como foi calculada a norma de *Xi – Xj*, quando utilizado como exemplo $\|X_3 - X_5\|$:

$$\|X_3 - X_5\| = \sqrt{(A3 - A5)^2 + (B3 - B5)^2 + (C3 - C5)^2 + (D3 - D5)^2 + ... + (G3 - G5)^2} \qquad (35)$$

Conforme demonstrado pelos autores do método, $C(r)$ deve variar com r da seguinte maneira:

$$\boldsymbol{C(r) \sim r^d} \qquad (36)$$

A dimensionalidade do atrator é dada pela inclinação de *ln* $C(r)$ *versus ln* r:

$$\boldsymbol{\ln C(r) = d \ln r} \qquad (37)$$

Após as considerações baseadas nas equações acima, os referidos autores sugerem o seguinte algoritmo:

1. A partir da construção de séries temporais (X_1, X_2, X_3, etc.), obter a função de correlação ($C(r)$), para valores sucessivamente maiores da dimensionalidade n do espaço de fase.
2. Obter a inclinação d de acordo com a equação (37), verificando como os resultados mudam conforme n aumenta (figura 9).
3. Se a dependência de n *versus* d está saturada além de algum n relativamente pequeno, o sistema representado pela série temporal possui um atrator (figura 10). O valor da saturação de d é estimado como a dimensionalidade do atrator representado pela série temporal. O valor de n correspondente à saturação é que dá o número mínimo de variáveis necessárias para o conhecimento do modelo representado pelo atrator.

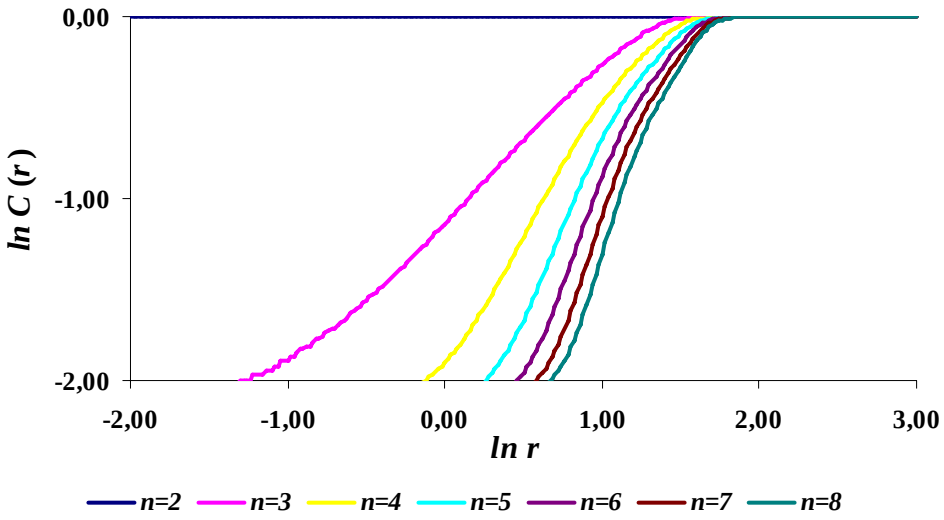


Figura 9. Inclinação de *ln C*(*r*) *versus ln r*.

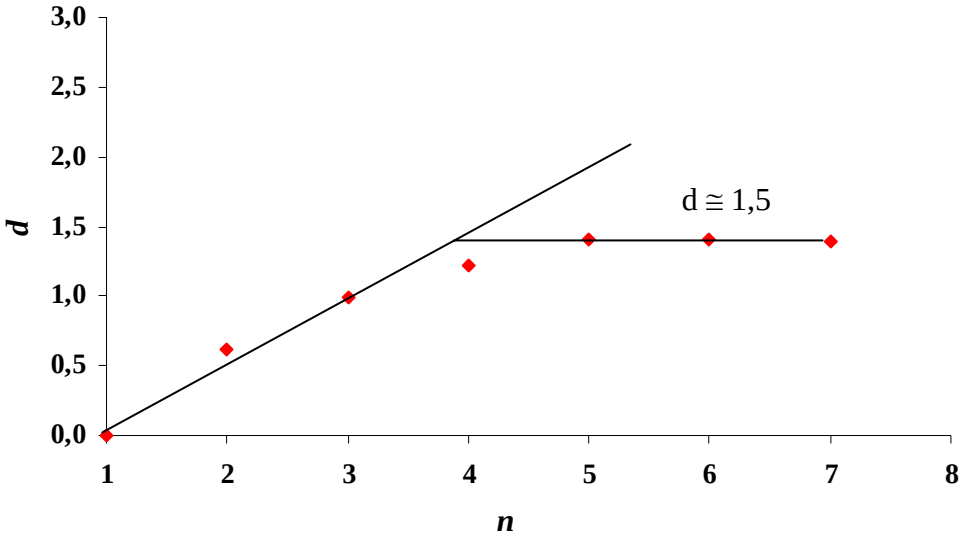


Figura 10. Representação da dimensionalidade do atrator (*d*) e do número mínimo de variáveis (*n*), necessárias para o conhecimento do modelo representado pelo atrator.

3.3. TRATAMENTO DOS DADOS

Os dados brutos coletados na torre micrometeorológica na Floresta de Transição foram trabalhados em planilhas eletrônicas e separados, tendo uma variável para cada coluna e esses dados armazenados por ano, os anos se subdividiram em meses e estes em dias; os dados diários foram acumulados a cada 30 minutos em um datalogger, começando de 0:00 hora a 23:30 horas. Para este estudo, utilizaram-se os dados dos anos de 1999 a 2003 que foram separados em novas planilhas, sendo reordenados por ano, com cada mês em uma planilha e o Dia Juliano em ordem crescente.

Nos anos em que os dados foram obtidos, houve falhas nos equipamentos, com diversos meses apresentando ausência de dados para alguns dias ou até o mês todo. Os meses com maior ausência de dados foram descartados.

As variáveis utilizadas neste trabalho foram o Fluxo de CO_2 (*Fc*), Fluxo de Calor Latente (*LE*) e Fluxo de Calor Sensível (*H*).

O Fluxo de Calor Latente (*LE*) e o Fluxo de Calor Sensível (*H*) foram quantificados usando-se a técnica micrometeorológica de correlação de vórtices turbulentos com base na torre que quantifica diretamente as trocas de massa e energia

da superfície-atmosfera, pela medida do transporte turbulento de vapor d'água e calor (VOURLITIS et al., 2002; VOURLITIS et al., 2001; VERMA, 1990; BALDOCCHI et al., 1988).

O cálculo do fluxo de CO_2 utiliza a técnica de AUBINET et al., (2000) que faz o somatório do perfil de CO_2 em diversas alturas da torre mais o Δ, onde Δ é o somatório de S_c (estoque de dióxido de carbono) + V_c (fluxo de advecção horizontal).

Em períodos em que ocorrerram falhas no sistema, o estoque de CO_2 do dossel foi estimado pelas medidas de concentração de CO_2 feitas no topo da torre (VOURLITIS et al., 2004).

Quando os dados brutos já estavam em planilhas eletrônicas, foi estimado qual o valor de τ seria mais adequado para a análise. O critério utilizado foi verificar qual defasagem temporal resultaria na pior correlação possível entre a série temporal dos dados originais (X_0) de cada mês e a série temporal obtida com uma defasagem τ (X_1). Utilizou-se a pior correlação entre os dados para se obter a maior variabilidade entre os mesmos, que é um dos requisitos do método analisado neste trabalho. Foi calculado o coeficiente de correlação linear simples entre X_0 e X_1 para cada mês. Os resultados que apresentaram uma correlação não significativa são apresentados na tabela 3.

Tabela 3. Meses e horários em que ocorreram correlações não significativas para os valores de *LE*, *H* e *Fc*.

Mês (*m*)	N° Dados	Tempo (*h*)	Correlação (*r*)
Ago/99	1092	13:00	0,01402
		13:30	0,08109
		22:30	0,00729
		23:00	0,01989
Fev/00	195	4:30	0,03747
		5:00	0,08045
		18:30	0,00374
		19:00	0,08122
Jul/00	433	8:00	0,01131
		8:30	0,09629
		17:30	0,07022
		18:00	0,04516
Dez/00	454	9:00	0,03353
		9:30	0,04932
		19:30	0,02019
		20:00	0,05517
Fev/01	1395	5:00	0,02059
		5:30	0,06663
		18:30	0,05173
		19:00	0,03701
Jun/01	601	4:30	0,06433
		5:00	0,04085
		19:00	0,03582
		19:30	0,07525
Mar/01	1444	5:00	0,03250
		5:30	0,04633
		18:30	0,03681
		19:00	0,05959
Jun/02	1092	13:00	0,01402
		13:30	0,08109
		22:30	0,07294
		23:00	0,01989

Analisando-se a tabela 3, observou-se que dentre os dados analisados, a menor correlação não significativa ocorreu no horário 18:30 *h*, com r = 0,00374 sendo um valor mais próximo de zero (destacado em vermelho), portanto este horário foi o τ procurado e esse valor foi fixo para as análises iniciais.

Com o objetivo de calcular $C(r)$, que pode ser referida como uma integral da *função de correlação* do atrator fez-se um programa em C++. Para as variáveis

analisadas, Fluxo de CO_2 (*Fc*), Fluxo de Calor Sensível (*H*) e Fluxo de Calor Latente (*LE*), foram inseridos no programa uma coluna com os dados originais, em ASCII, sendo uma variável por vez.

O programa gerou um arquivo de dados no formato TXT, chamado RESULT, que pôde ser lido por editores de texto ou planilhas eletrônicas. Esse arquivo foi transferido para uma planilha do programa Microsoft Excel e os dados de $ln\ C(r)$ foram separados em colunas de acordo com a dimensão (n = 2 a n = 9). Os dados de $ln\ (r)$ que variaram de -2,00 a 3,00, com um incremento de 0,02, formaram outra coluna e esses dados foram plotados em um gráfico onde se analisou a inclinação de cada reta, para verificar os valores da dimensão do atrator (d) correspondentes a n.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. O ATRATOR CLIMÁTICO

Através da análise de uma determinada série temporal de uma variável por vez, Fluxo de CO_2 (*Fc*), Fluxo de Calor Latente (*LE*) e Fluxo de Calor Sensível (*H*), procurou-se delinear quantas variáveis interdependentes estavam interligadas em cada variável analisada que faz parte do ecossistema ou sistema complexo.

As figuras 11 a 73. referidas como (a) apresentam a dependência de *ln C*(*r*) *versus ln r* para os Fluxos de CO_2 (*Fc*), Calor Latente (*LE*) e Calor Sensível (*H*) com *n* variando de 2 a 9, tendo uma região extensa, acima da qual a dependência se torna linear ou assintótica, de acordo com a equação (37), descrita por NICOLIS e PRIGOGINE (1998), mostrando que os dados analisados tendem a estabilidade convergindo para um atrator climático.

As séries temporais dos Fluxos de CO_2 (*Fc*), Calor Latente (*LE*) e Calor Sensível (*H*) sofreram uma saturação para a dependência de *n versus d*, indicando que o sistema possui um atrator climático.

Os períodos do ano, para análise da influência da sazonalidade em relação aos fluxos analisados, foram divididos conforme ARRUDA (2004): 1 – Período Seco, compreendido entre os meses de junho a agosto; 2 – Período Intermediário Seco Chuvoso, compreendido entre os meses de setembro a novembro; 3 – Período Chuvoso, compreendido entre os meses de dezembro a fevereiro e 4 – Período Intermediário Chuvoso Seco, compreendido entre os meses de março a maio.

4.1.1. Resultados para o Fluxo de CO_2 (*Fc*)

O valor da dimensionalidade do atrator (*d*) sofreu influência da sazonalidade, com maior incidência no Período Chuvoso, representado pelo mês de Fevereiro de 2001, variando de 1,4 para τ = 18:30 *h* a 2,7 para τ = 1 *h*, conforme tabela 4 e figuras 11. (b) e 16. (b).

O valor da dimensionalidade do atrator (*d*), para o Período Seco de 2000 (Jul/00) variou de 0,6 para τ = 18:30 *h* e 2,2 para τ = 1 *h*, conforme tabela 4 e figuras 17. (b) e 22. (b), sendo menor do que no Período Seco de 2002 (Ago/02), que variou de 1,4 (τ = 18:30 *h*) a 2,5 (τ = 1 *h*), como mostrado na tabela 4 e figuras 23. (b) e 28. (b).

O número de variáveis do espaço de fase (*n*), esteve entre 6 e 7 no Período Chuvoso de 2001 (Fev/01), conforme tabela 4 e figuras 11. (b) a 16. (b); entre 5 e 7 no Período Seco de 2000 (Jul/00) conforme tabela 4 e figuras 17. (b) a 22. (b) e entre 5 e 6 no Período Seco de 2002 (Ago/02) conforme tabela 4 e figuras 23. (b) a 28. (b).

As figuras de 29 a 43, mostram o perfil de fase, representando a evolução temporal para o Fluxo de CO_2 nos períodos analisados. Para estas figuras o Período Chuvoso foi representado pelo mês de Fevereiro de 2001 e o Período Seco, representado pelos meses de Julho de 2000 e Agosto de 2002. As figuras foram plotadas em um espaço tridimensional, com o intuito de demonstrar com mais clareza a região do espaço de fase onde se localizou o atrator, ou seja, a região do espaço de fase em que os dados analisados foram encontrados com maior freqüência.

Tabela 4. Fluxo de CO_2 (*Fc*) em relação à dimensionalidade do atrator (*d*), a defasagem (τ) e o número de variáveis do espaço de fase (*n*).

Variável	**Período**	**Mês/Ano**	***d***	**τ (horas)**	***n***
Fc	Chuvoso	Fev/01	2,7	1:00	7
Fc	Chuvoso	Fev/01	2,1	1:30	6
Fc	Chuvoso	Fev/01	1,8	2:30	7
Fc	Chuvoso	Fev/01	2,1	3:00	7
Fc	Chuvoso	Fev/01	1,8	5:30	6
Fc	Chuvoso	Fev/01	1,4	18:30	6
Fc	Seco	Jul/00	2,2	1:00	7
Fc	Seco	Jul/00	1,7	1:30	7
Fc	Seco	Jul/00	1,6	2:30	6
Fc	Seco	Jul/00	1,7	3:00	6
Fc	Seco	Jul/00	1,3	5:30	6
Fc	Seco	Jul/00	0,6	18:30	5
Fc	Seco	Ago/02	2,5	1:00	6
Fc	Seco	Ago/02	2,2	1:30	7
Fc	Seco	Ago/02	2,2	2:30	6
Fc	Seco	Ago/02	1,9	3:00	6
Fc	Seco	Ago/02	2,1	5:30	6
Fc	Seco	Ago/02	1,4	18:30	5

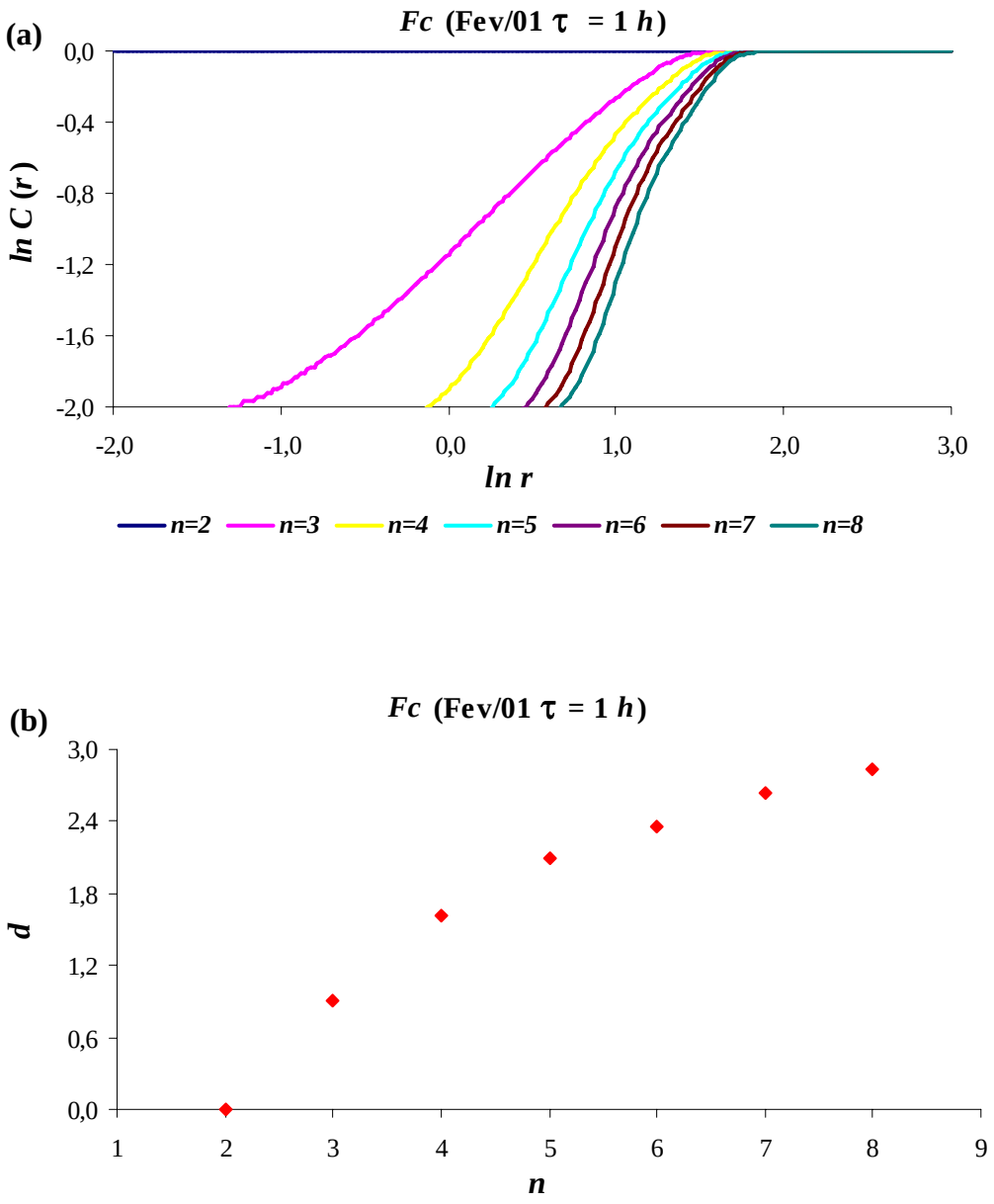


Figura 11. (a) Representação de *ln C*(*r*) *versus ln r* para o Fluxo de CO_2 (*Fc*) para o Período Chuvoso (Fev/01), e τ = 1:00 *h*. (b) Dependência da dimensionalidade (*d*) em relação ao número das variáveis do espaço de fase (*n*).

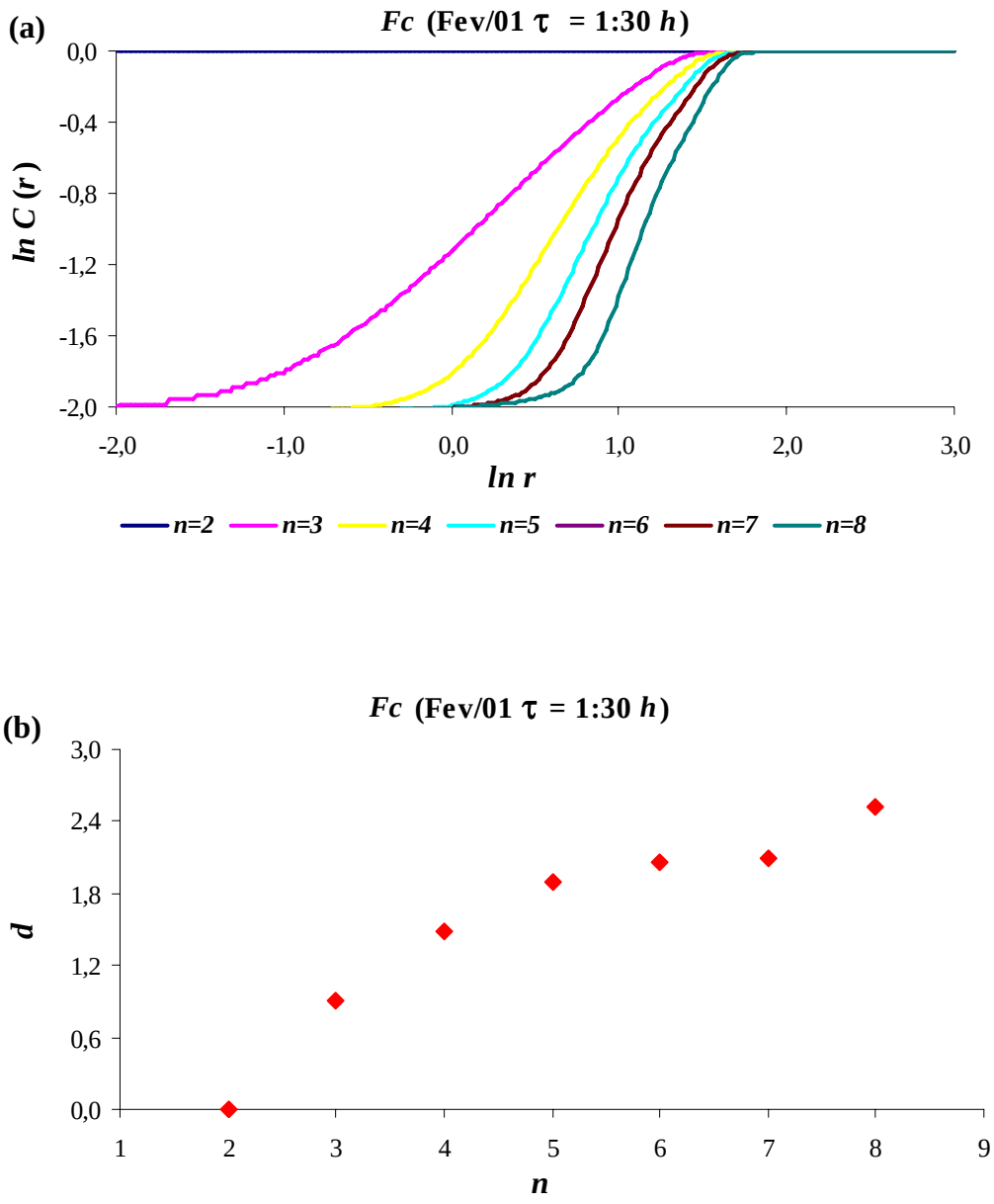


Figura 12. (a) Representação de *ln C*(*r*) *versus ln r* para o Fluxo de CO_2 (*Fc*) para o Período Chuvoso (Fev/01) e τ = 1:30 *h*. (b) Dependência da dimensionalidade (*d*) em relação ao número das variáveis do espaço de fase (*n*).

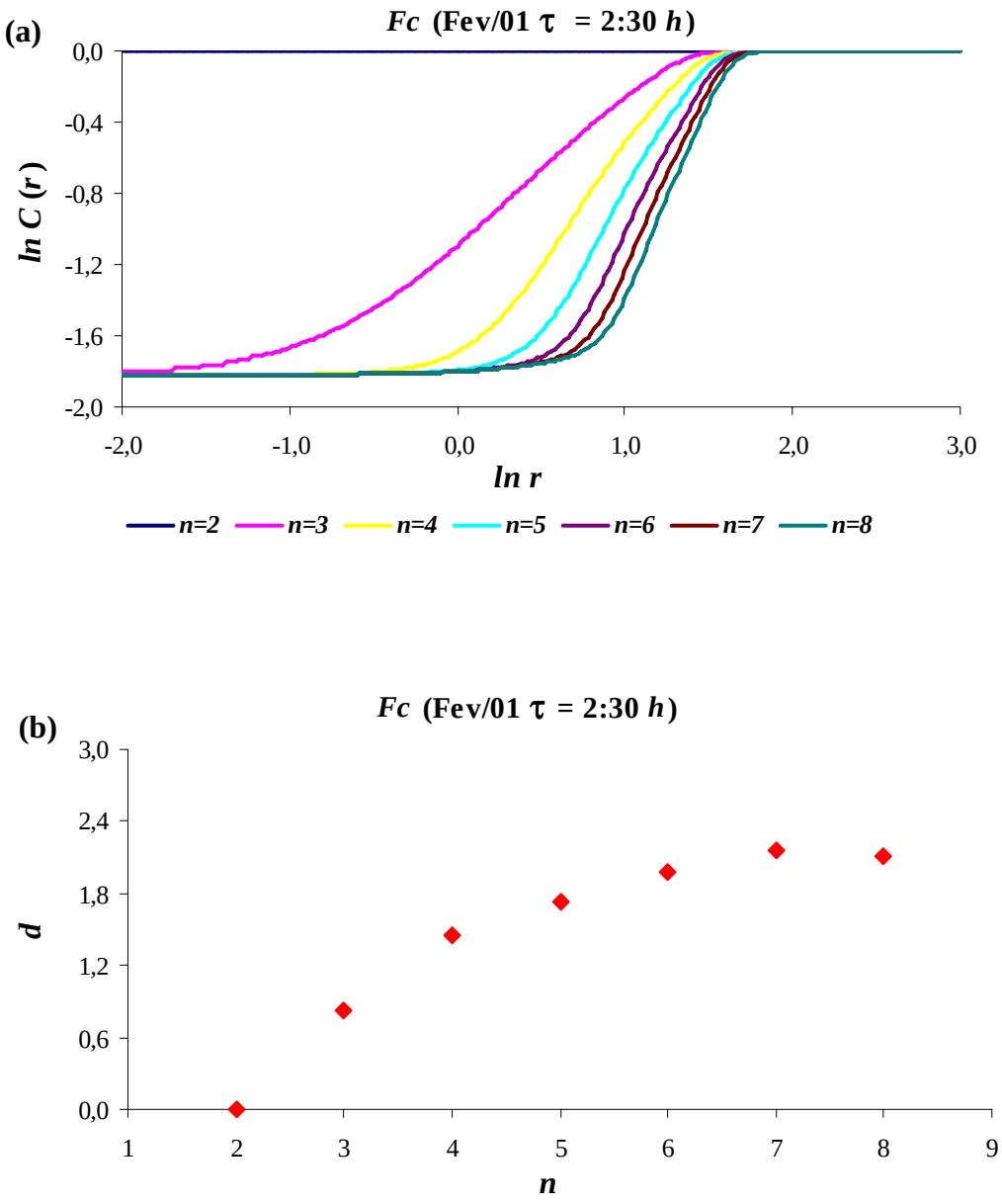


Figura 13. (a) Representação de *ln C*(*r*) *versus ln r* para o Fluxo de CO_2 (*Fc*) para o período chuvoso (Fev/01) e τ = 2:30 *h*. (b) Dependência da dimensionalidade (*d*) em relação ao número das variáveis do espaço de fase (*n*).

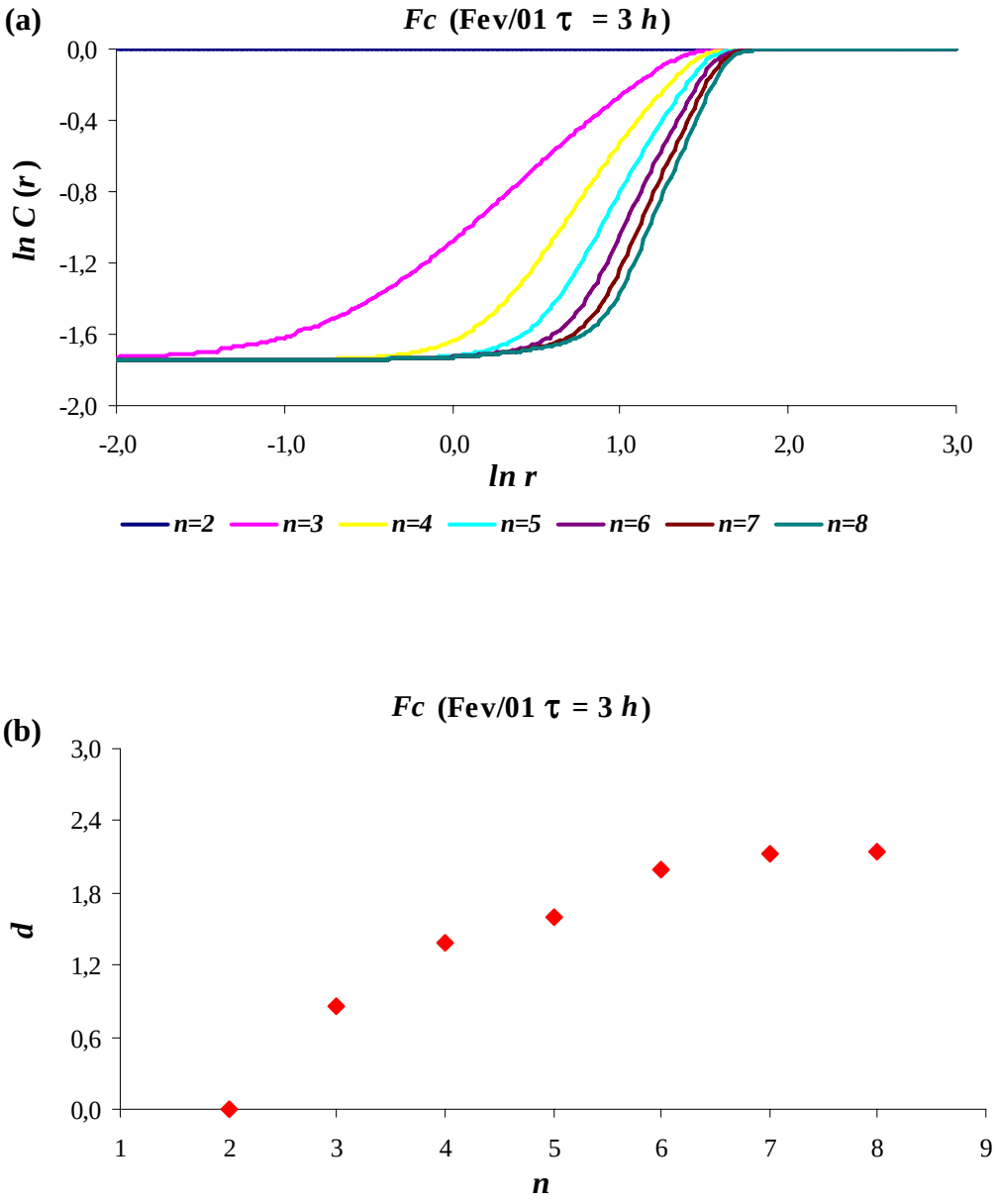


Figura 14. (a) Representação de *ln C*(*r*) *versus ln r* para o Fluxo de CO_2 (*Fc*) para o Período Chuvoso (Fev/01) e τ = 3 *h*. (b) Dependência da dimensionalidade (*d*) em relação ao número das variáveis do espaço de fase (*n*).

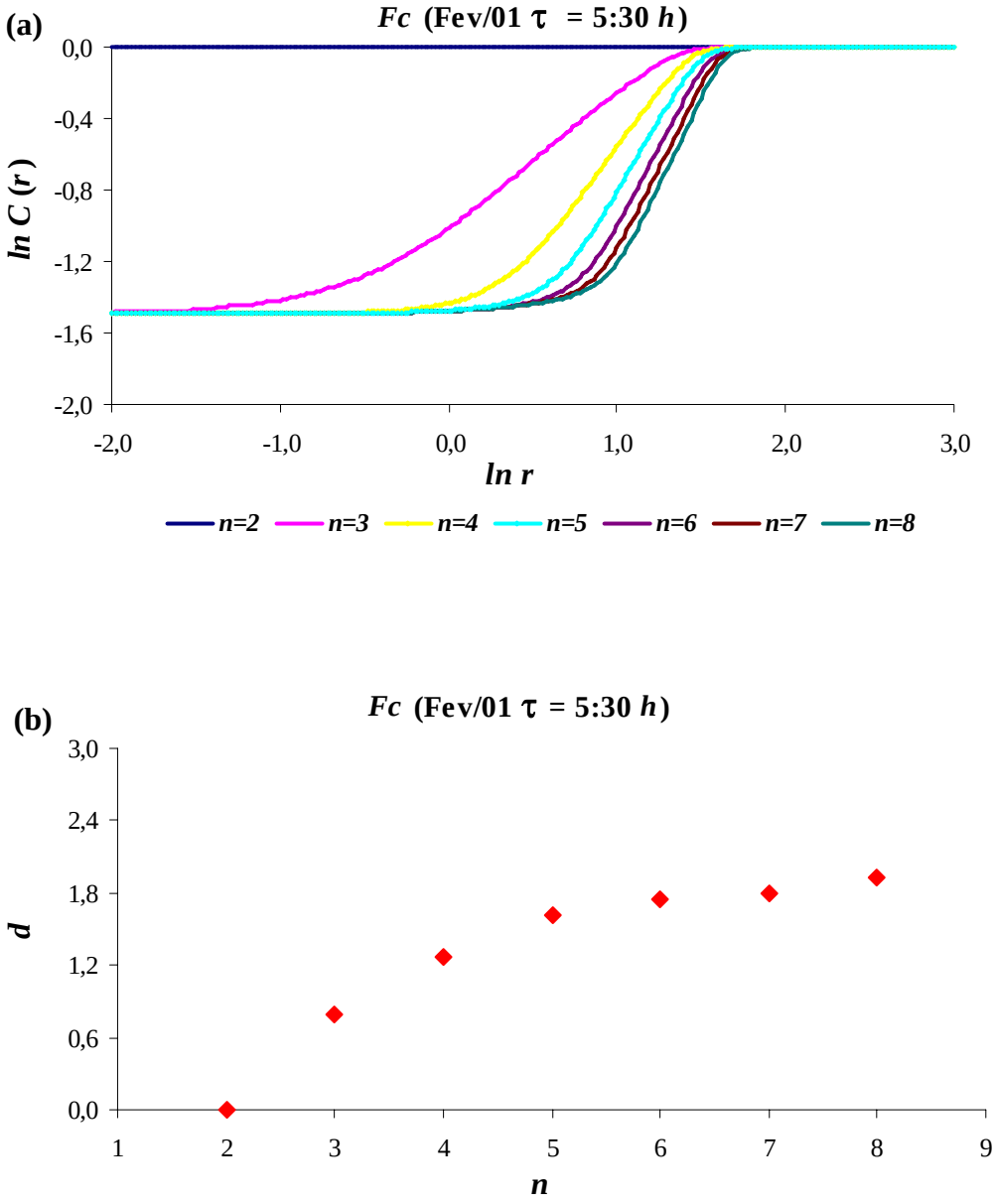


Figura 15. (a) Representação de *ln C*(*r*) *versus ln r* para o Fluxo de CO_2 (*Fc*) para o Período Chuvoso (Fev/01) e τ = 5:30 *h*. (b) Dependência da dimensionalidade (*d*) em relação ao número das variáveis do espaço de fase (*n*).

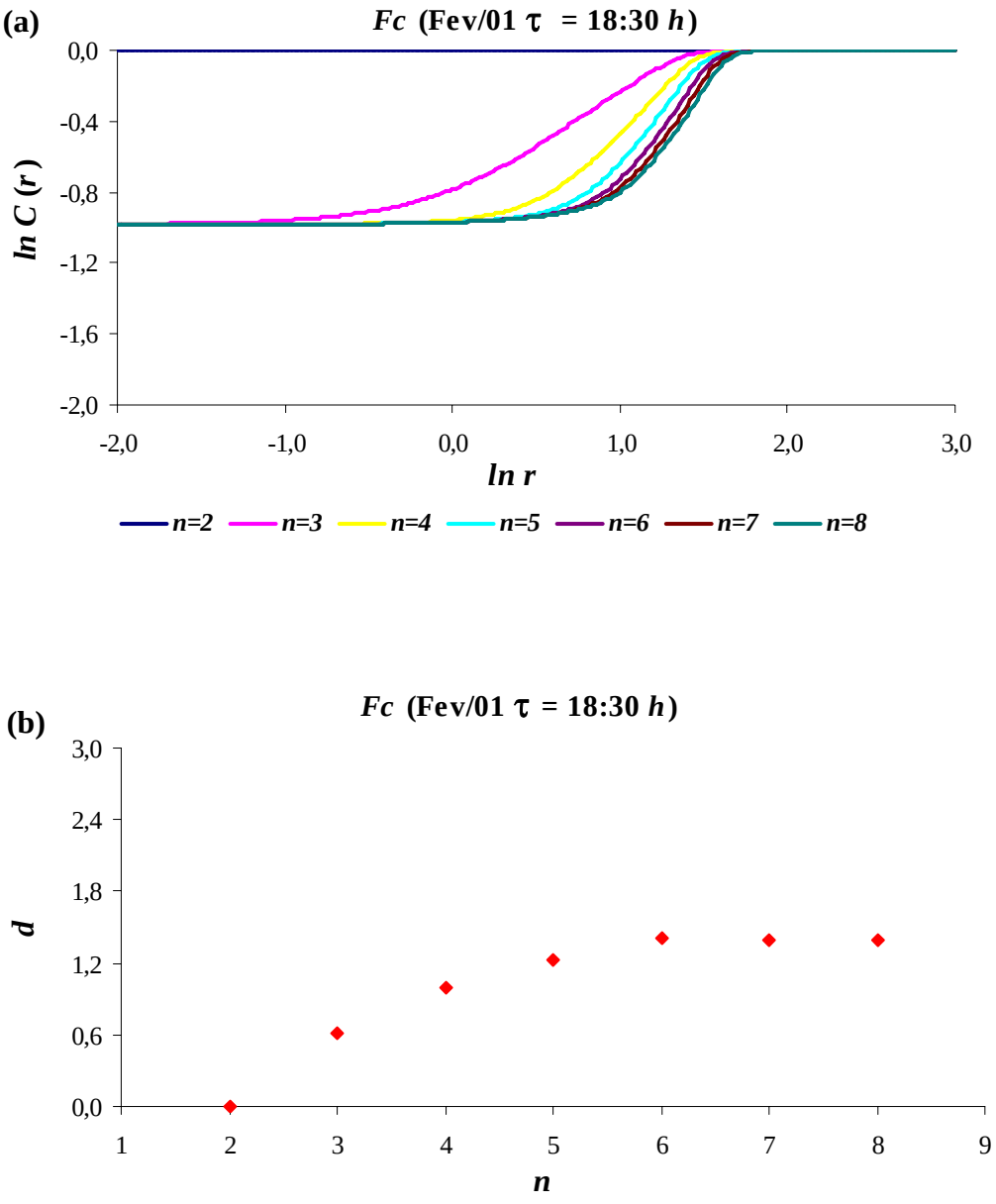


Figura 16. (a) Representação de *ln C*(*r*) *versus ln r* para o Fluxo de CO_2 (*Fc*) para o Período Chuvoso (Fev/01) e τ = 18:30 *h*. (b) Dependência da dimensionalidade (*d*) em relação ao número das variáveis do espaço de fase (*n*).

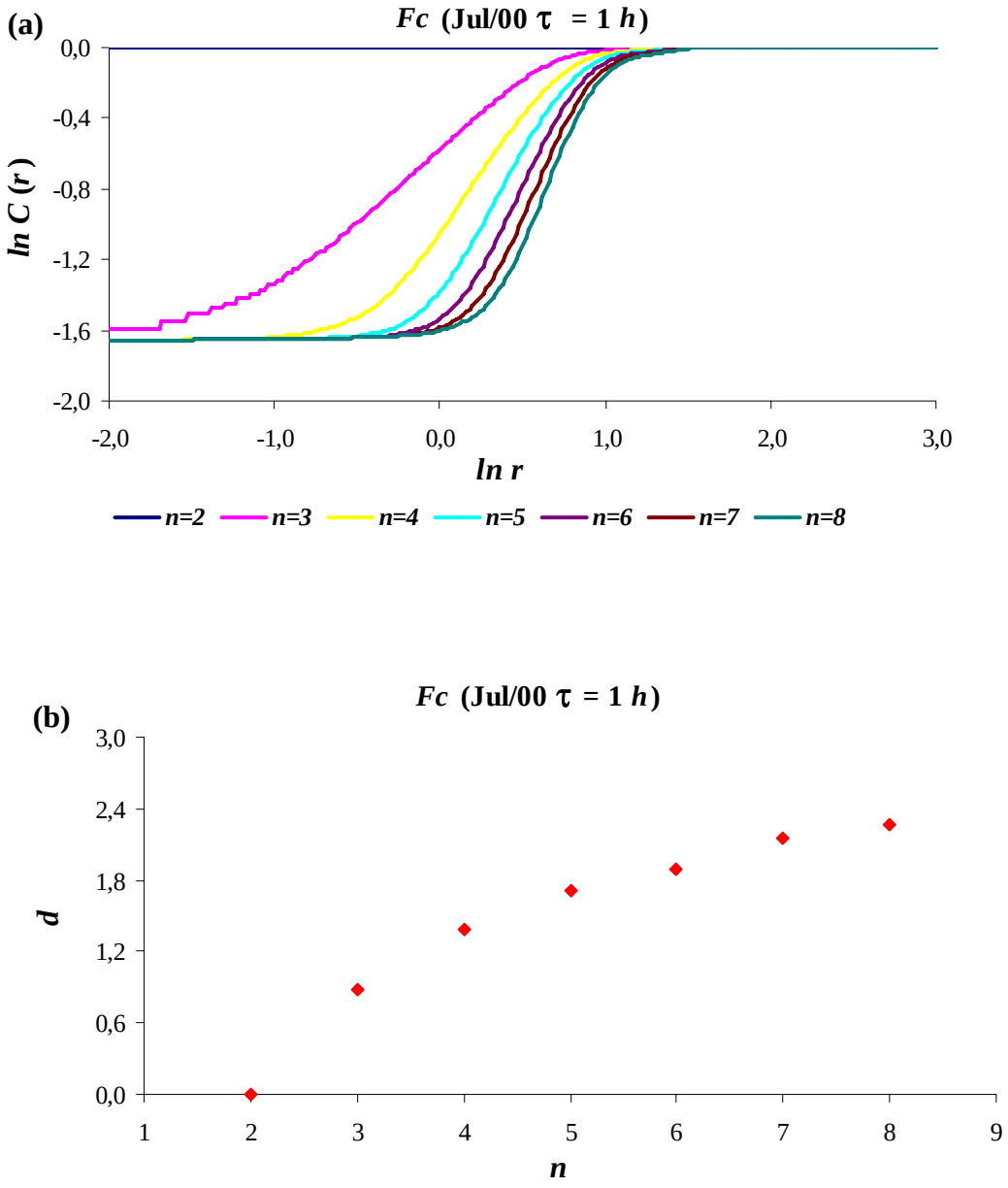


Figura 17. (a) Representação de *ln C*(*r*) *versus ln r* para o Fluxo de CO_2 (*Fc*) para o Período Seco (Jul/00) e τ = 1 *h*. (b) Dependência da dimensionalidade (*d*) em relação ao número das variáveis do espaço de fase (*n*).

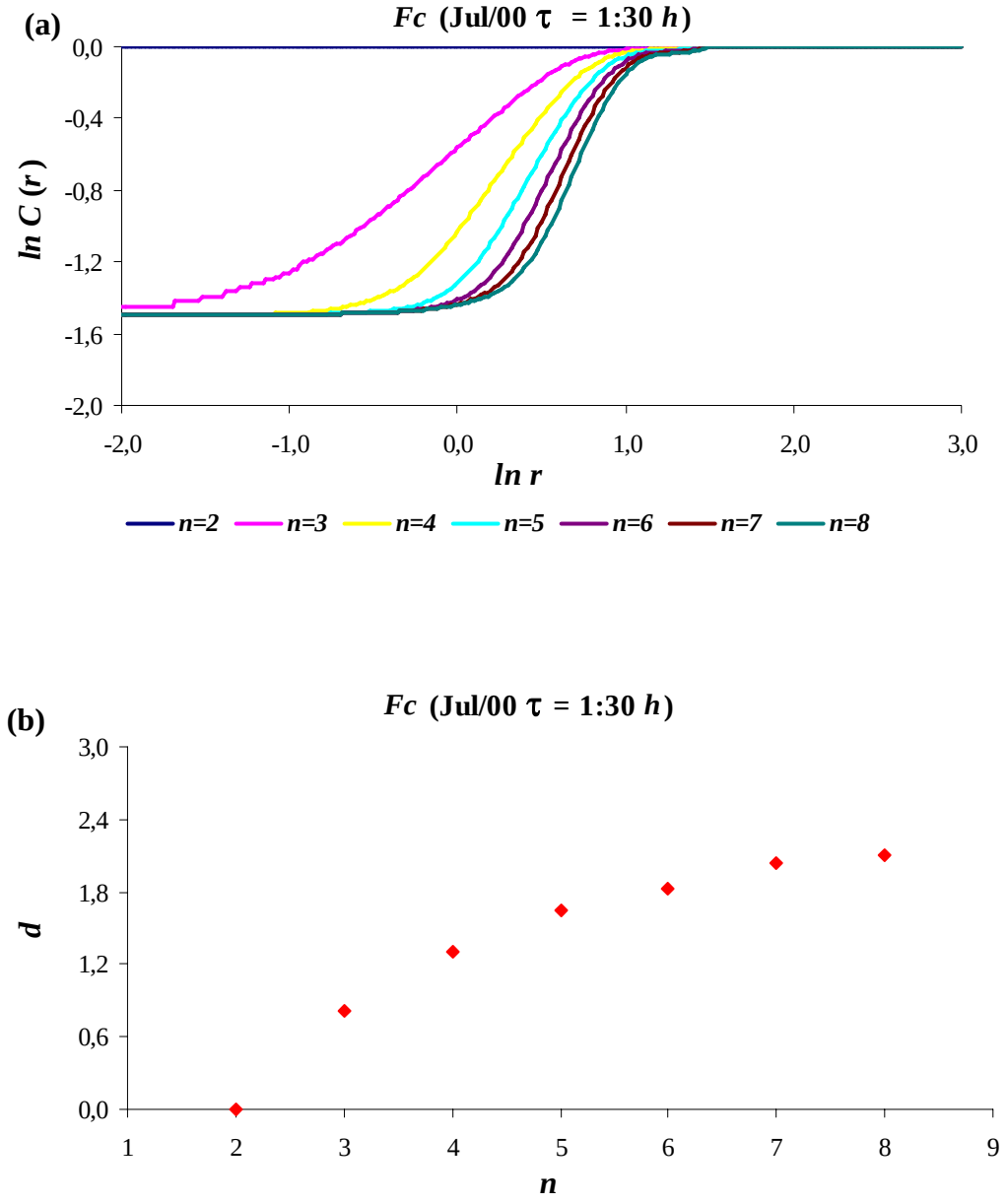


Figura 18. (a) Representação de *ln C*(*r*) *versus ln r* para o Fluxo de CO_2 (*Fc*) para o Período Seco (Jul/00) e τ = 1:30 *h*. (b) Dependência da dimensionalidade (*d*) em relação ao número das variáveis do espaço de fase (*n*).

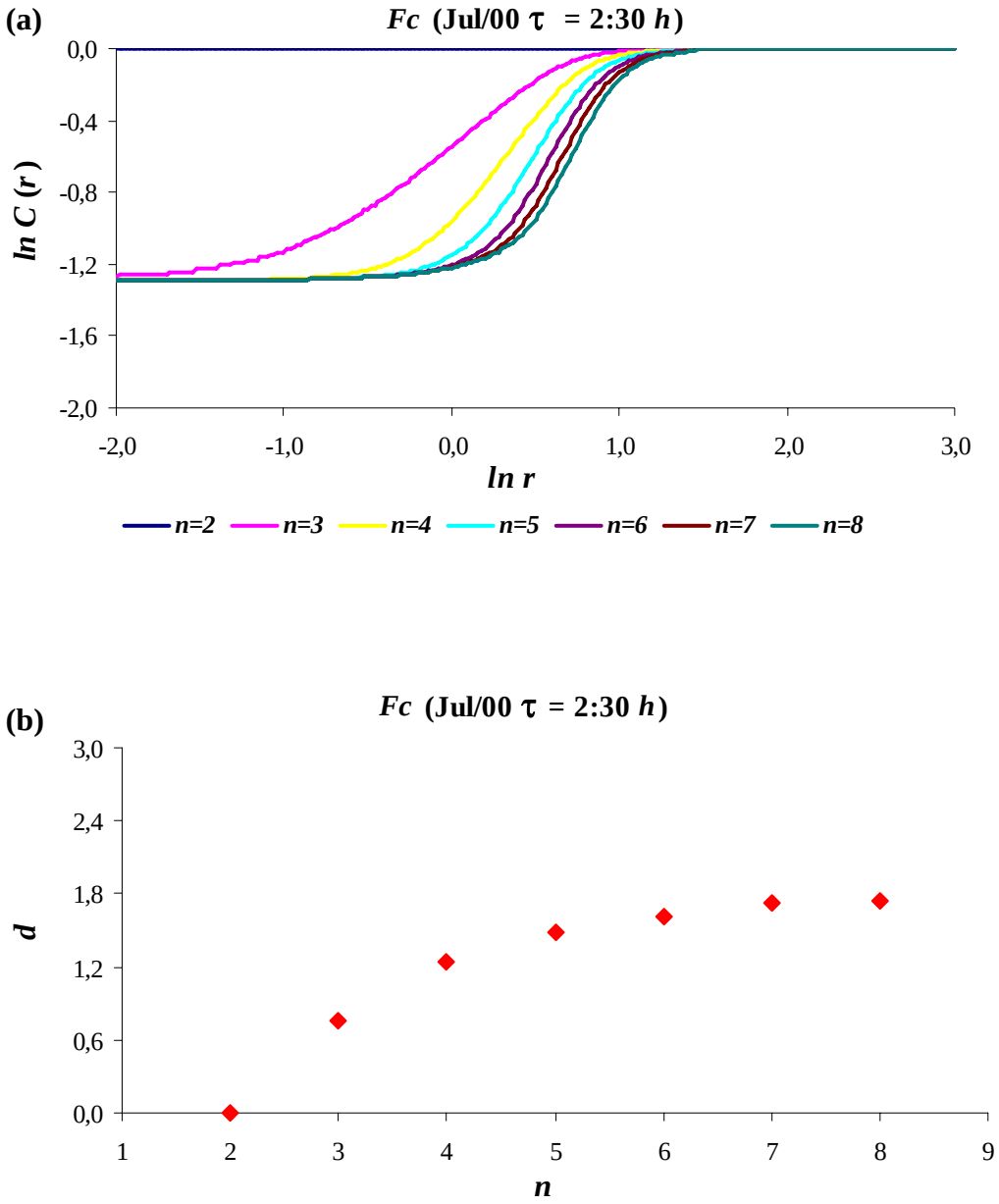


Figura 19. (a) Representação de *ln C*(*r*) *versus ln r* para o Fluxo de CO_2 (*Fc*) para o Período Seco (Jul/00) e τ = 2:30 *h*. (b) Dependência da dimensionalidade (*d*) em relação ao número das variáveis do espaço de fase (*n*).

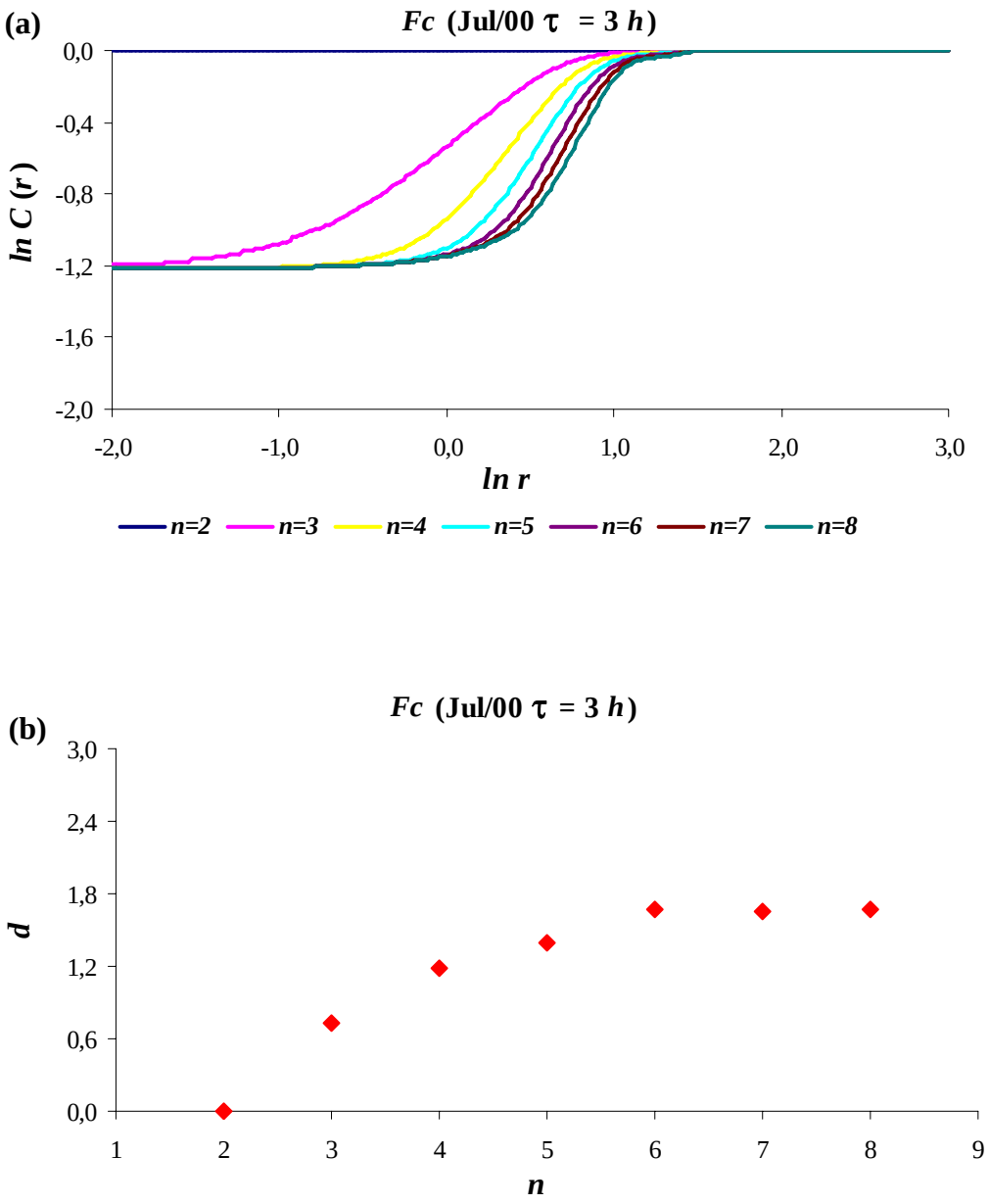


Figura 20. (a) Representação de *ln C*(*r*) *versus ln r* para o Fluxo de CO_2 (*Fc*) para o Período Seco (Jul/00) e τ = 3 *h*. (b) Dependência da dimensionalidade (*d*) em relação ao número das variáveis do espaço de fase (*n*).

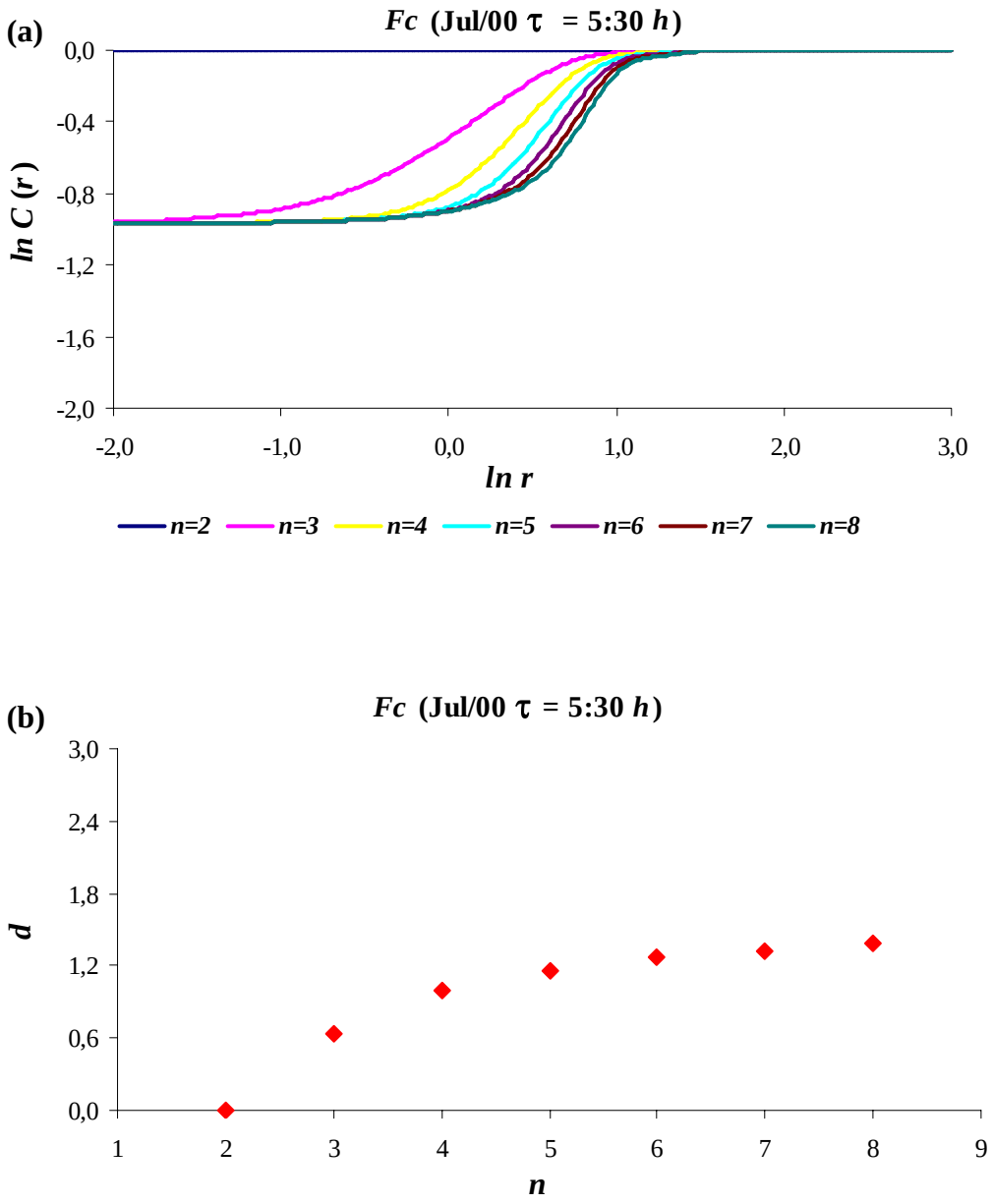


Figura 21. (a) Representação de *ln C*(*r*) *versus ln r* para o Fluxo de CO_2 (*Fc*) para o Período Seco (Jul/00) e τ = 5:30 *h*. (b) Dependência da dimensionalidade (*d*) em relação ao número das variáveis do espaço de fase (*n*).

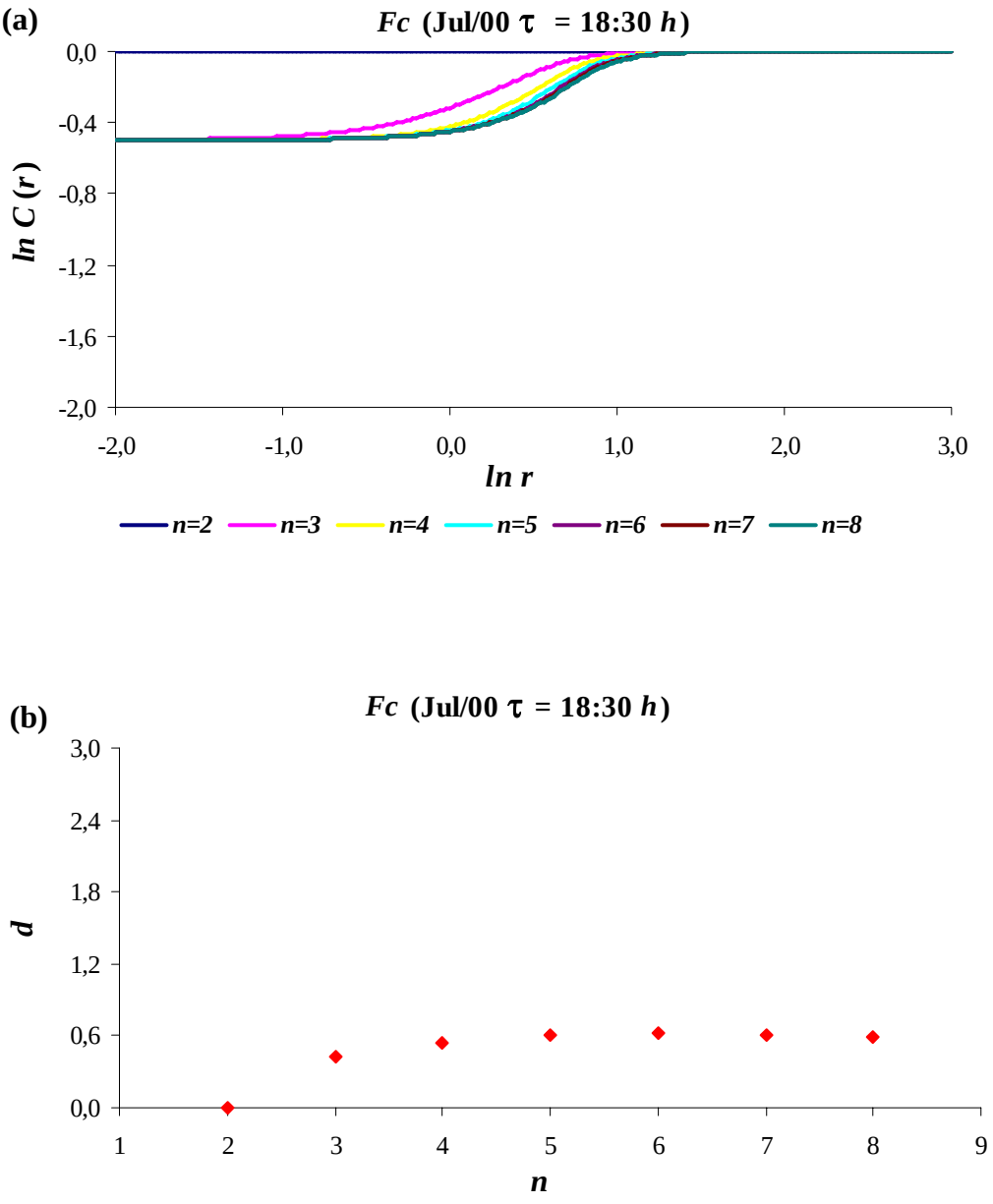


Figura 22. (a) Representação de *ln C*(*r*) *versus ln r* para o Fluxo de CO_2 (*Fc*) para o Período Seco (Jul/00) e τ = 18:30 *h*. (b) Dependência da dimensionalidade (*d*) em relação ao número das variáveis do espaço de fase (*n*).

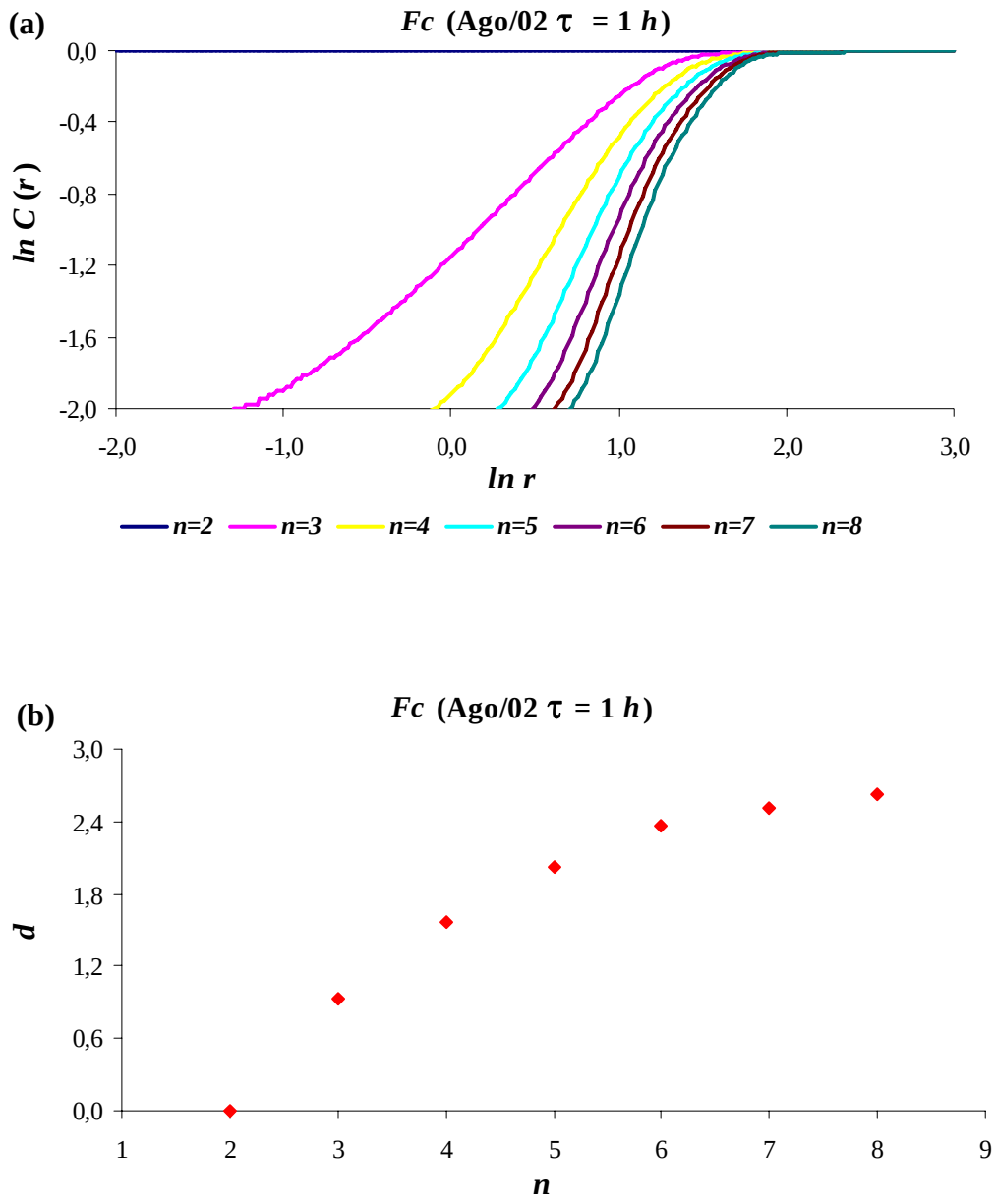


Figura 23. (a) Representação de *ln C*(*r*) *versus ln r* para o Fluxo de CO_2 (*Fc*) para o Período Seco (Ago/02) e τ = 1 *h*. (b) Dependência da dimensionalidade (*d*) em relação ao número das variáveis do espaço de fase (*n*).

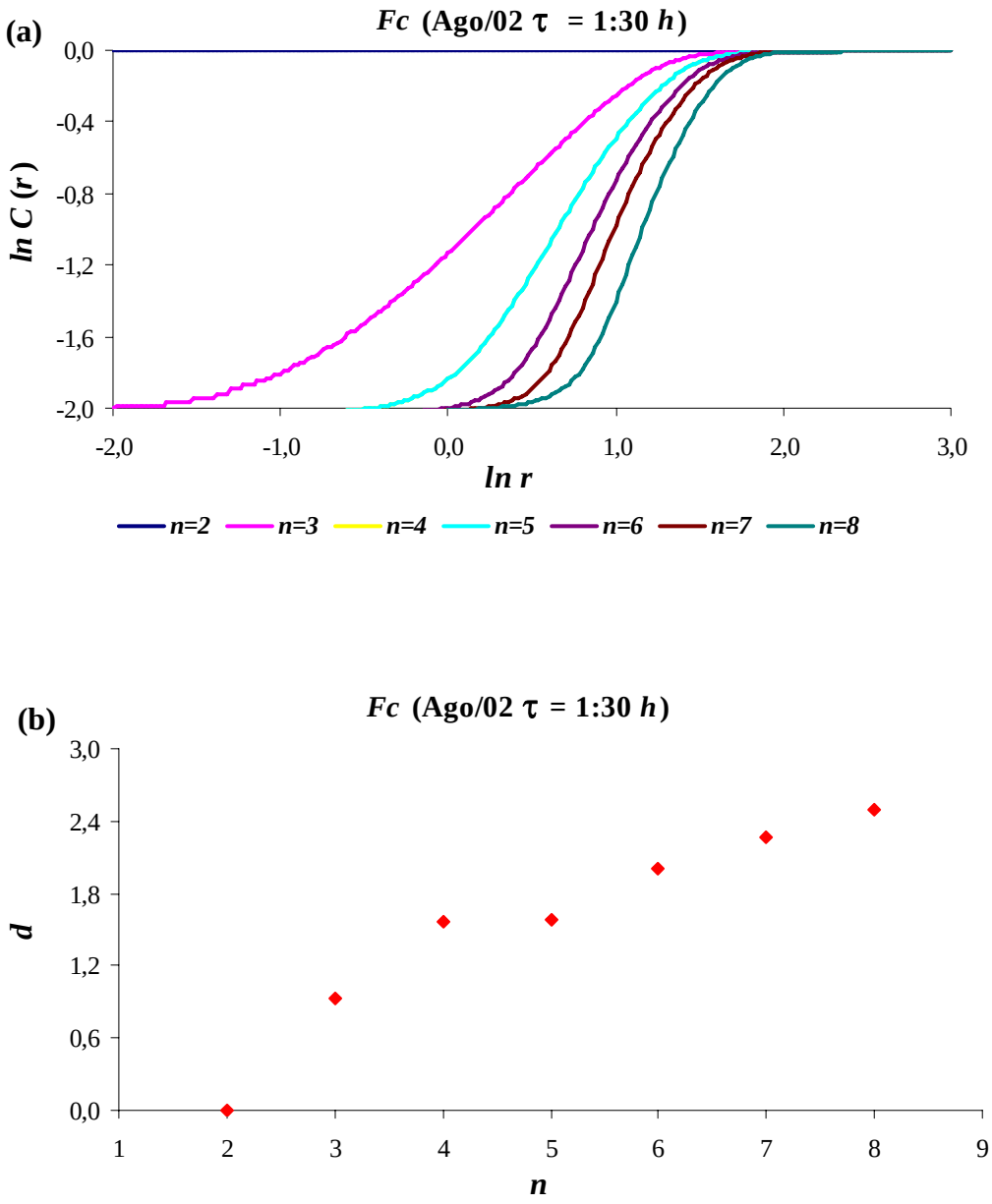


Figura 24. (a) Representação de *ln C*(*r*) *versus ln r* para o Fluxo de CO_2 (*Fc*) para o Período Seco (Ago/02) e τ = 1:30 *h*. (b) Dependência da dimensionalidade (*d*) em relação ao número das variáveis do espaço de fase (*n*).

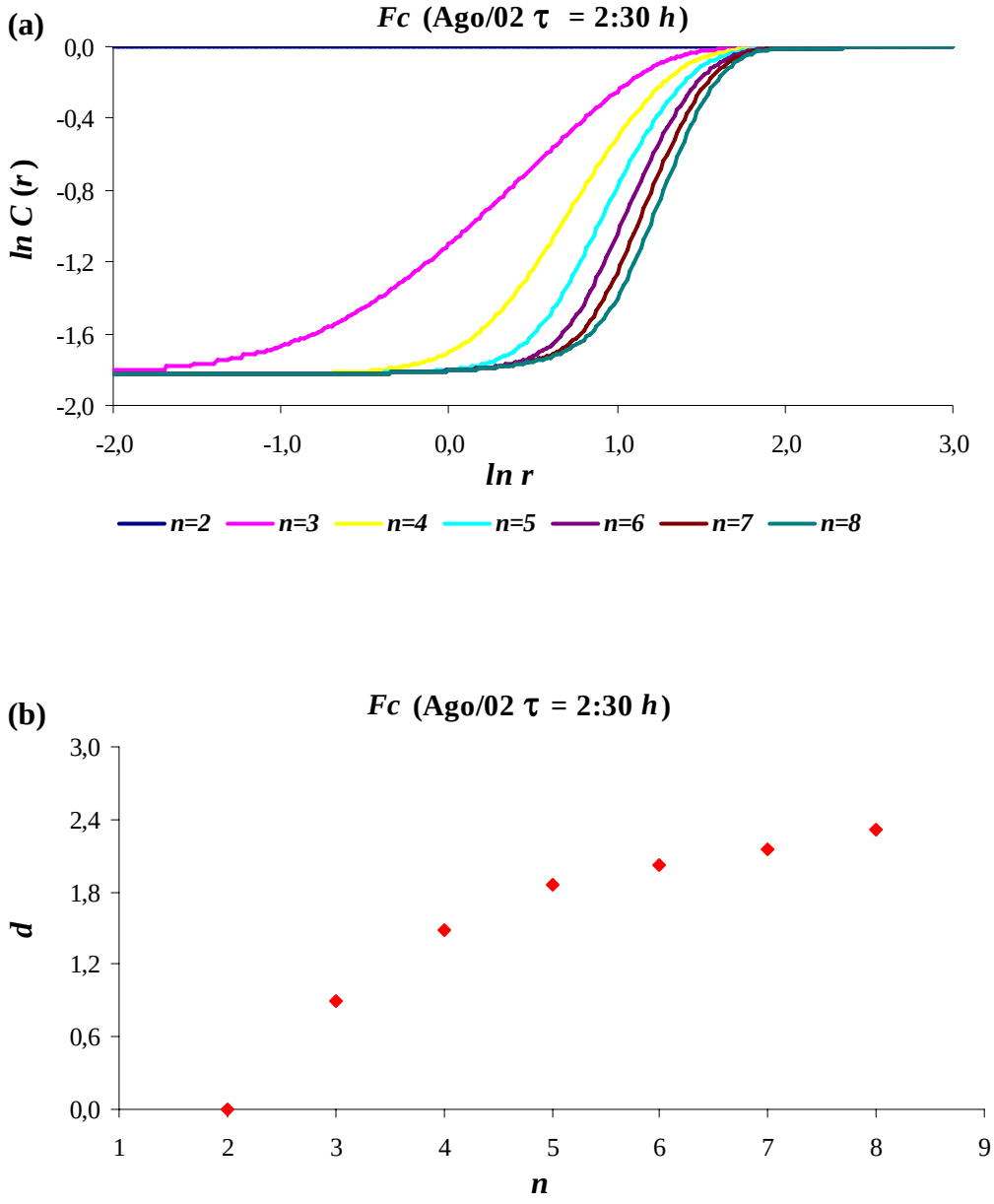


Figura 25. (a) Representação de *ln C*(*r*) *versus ln r* para o Fluxo de CO_2 (*Fc*) para o Período Seco (Ago/02) e τ = 2:30 *h*. (b) Dependência da dimensionalidade (*d*) em relação ao número das variáveis do espaço de fase (*n*).

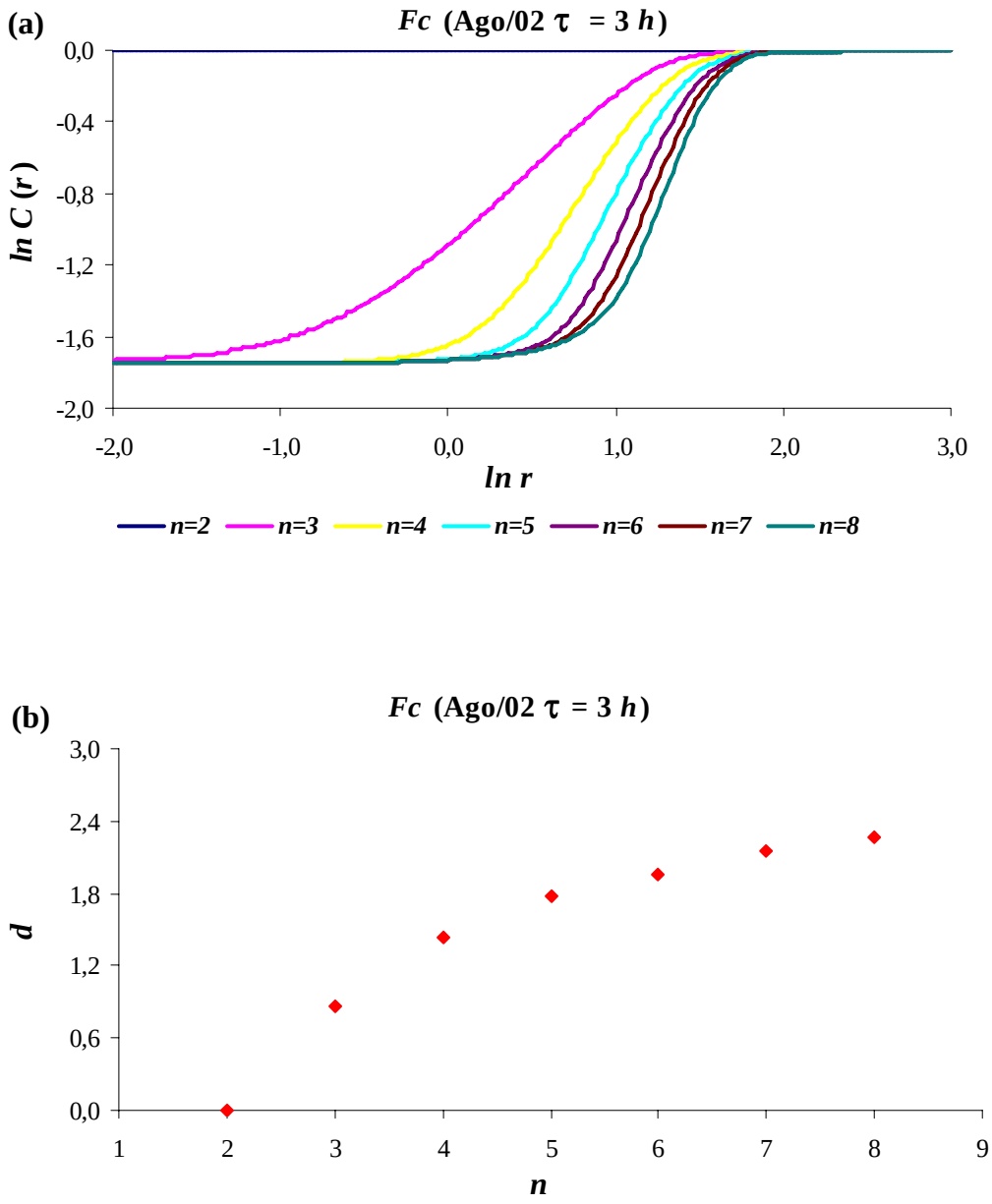


Figura 26. (a) Representação de *ln C*(*r*) *versus ln r* para o Fluxo de CO_2 (*Fc*) para o Período Seco (Ago/02) e τ = 3 *h*. (b) Dependência da dimensionalidade (*d*) em relação ao número das variáveis do espaço de fase (*n*).

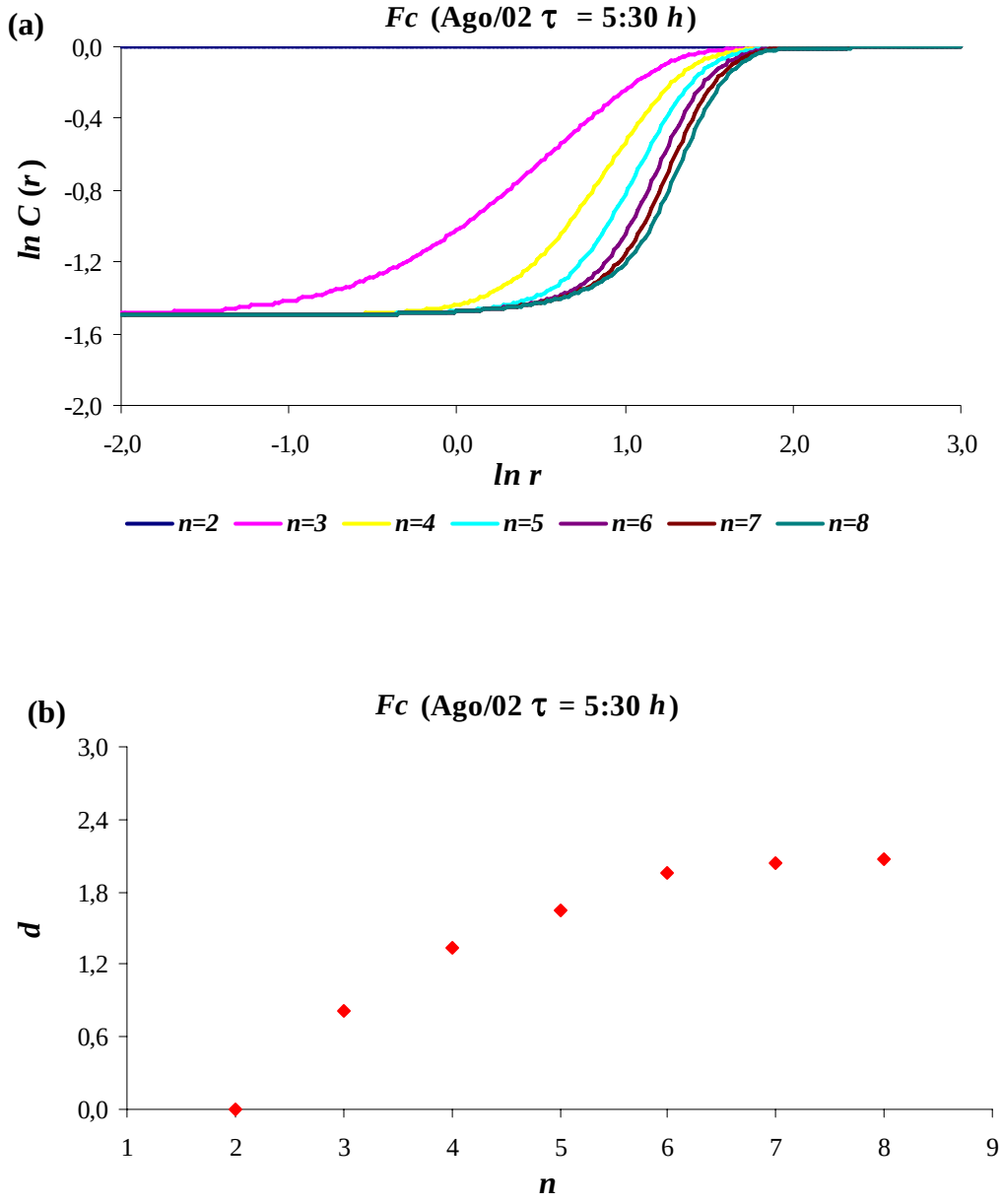


Figura 27. (a) Representação *de ln C*(*r*) *versus ln r* para o Fluxo de CO_2 (*Fc*) para o Período Seco (Ago/02) e τ = 5:30 *h*. (b) Dependência da dimensionalidade (*d*) em relação ao número das variáveis do espaço de fase (*n*).

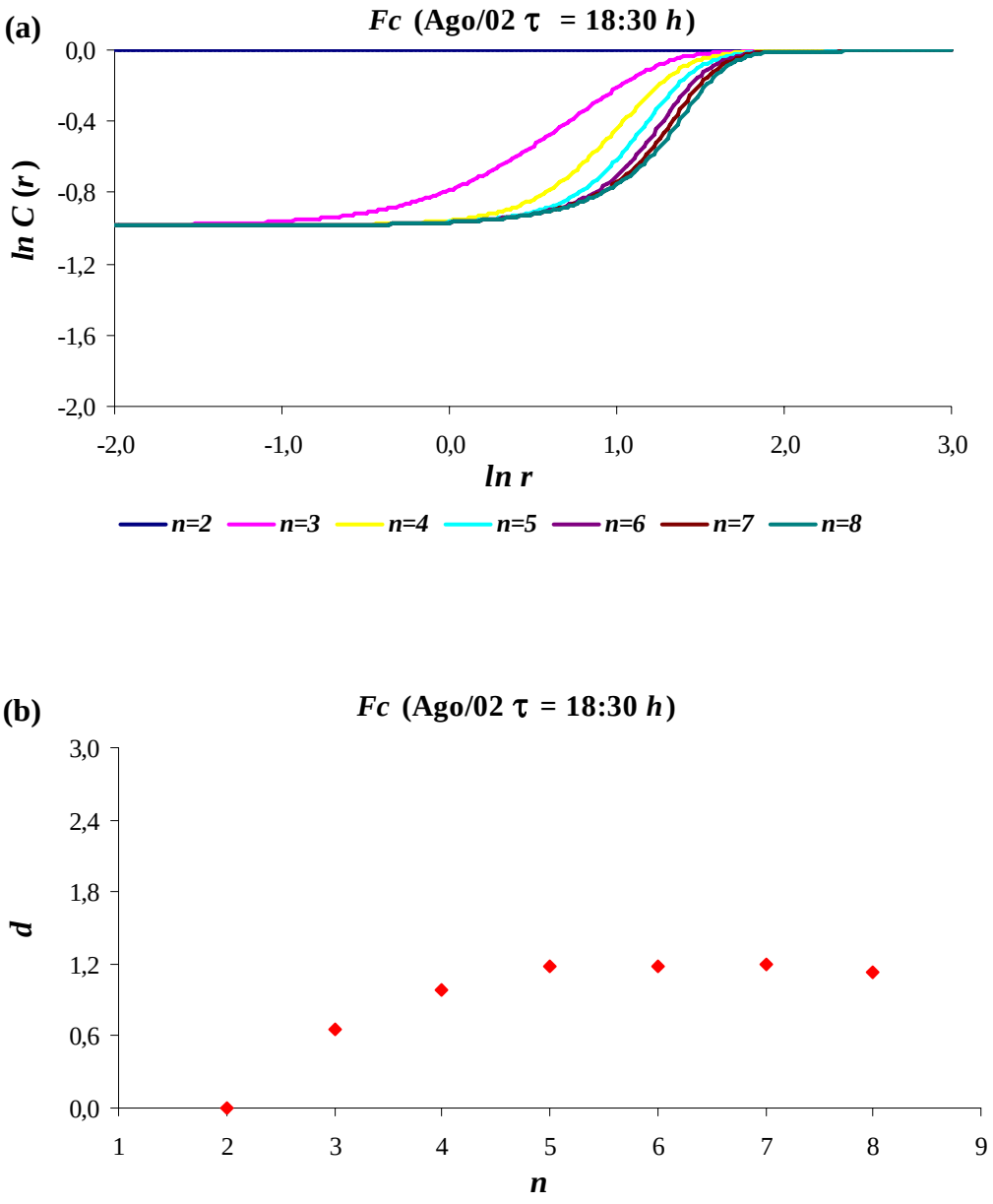


Figura 28. (a) Representação de *ln C*(*r*) *versus ln r* para o Fluxo de CO_2 (*Fc*) para o Período Seco (Ago/02) e τ = 18:30 *h*. (b) Dependência da dimensionalidade (*d*) em relação ao número das variáveis do espaço de fase (*n*).

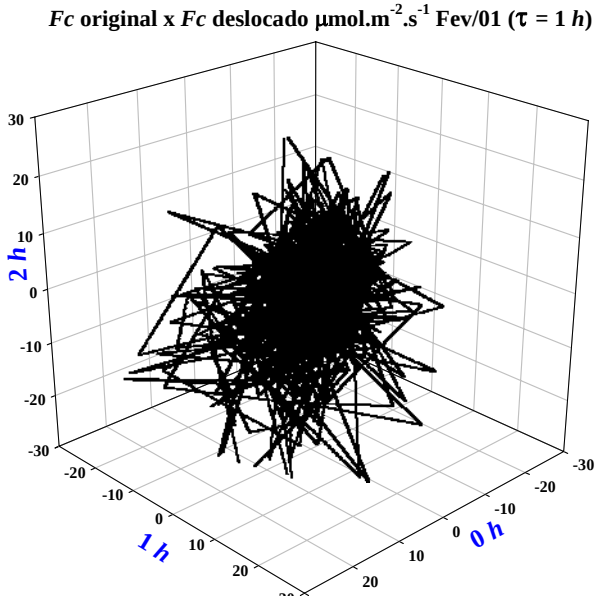


Figura 29. Perfil de fase da evolução temporal do Fluxo de CO_2 (*Fc*) para Fev/01 e τ = 1 *h*.

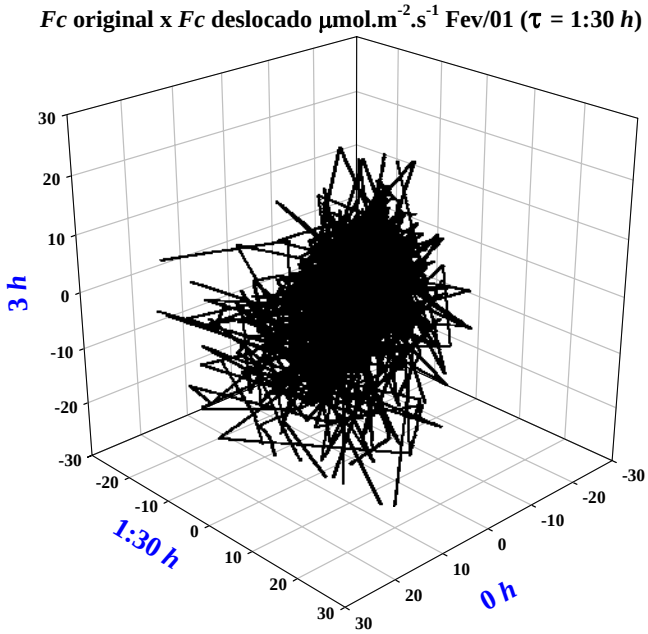


Figura 30. Perfil de fase da evolução temporal do Fluxo de CO_2 (*Fc*) para Fev/01 e τ = 1:30 *h*.

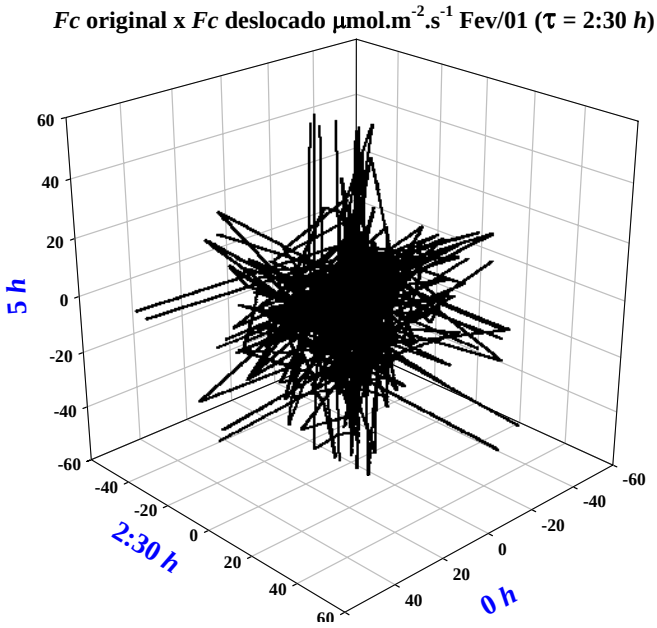


Figura 31. Perfil de fase da evolução temporal do Fluxo de CO_2 (*Fc*) para Fev/01 e τ = 2:30 *h*.

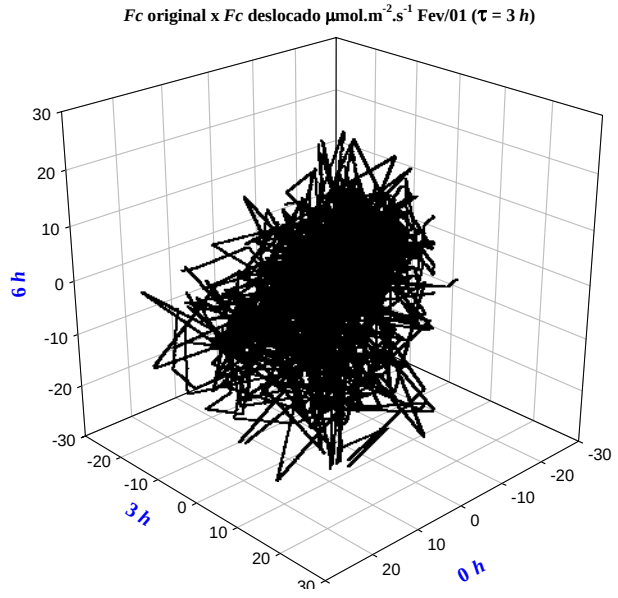
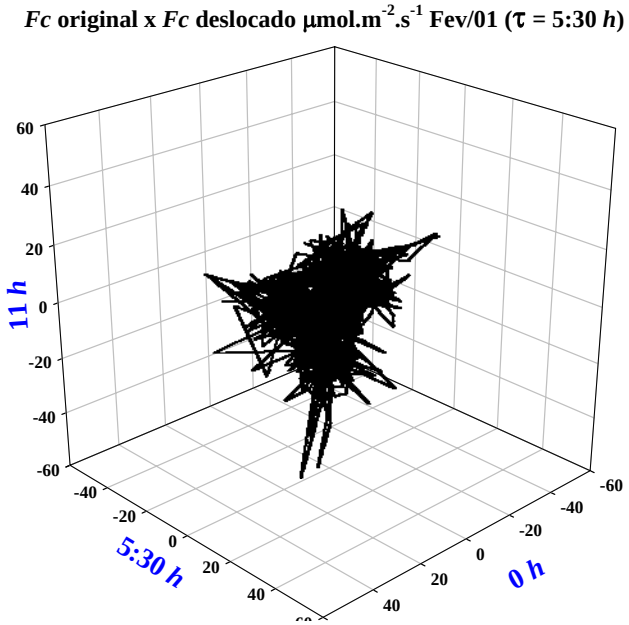


Figura 32. Perfil de fase da evolução temporal do Fluxo de CO_2 (*Fc*) para Fev/01 e



τ = 3 *h*.

Figura 33. Perfil de fase da evolução temporal do Fluxo de CO_2 (*Fc*) para Fev/01 e τ = 5:30 *h*.

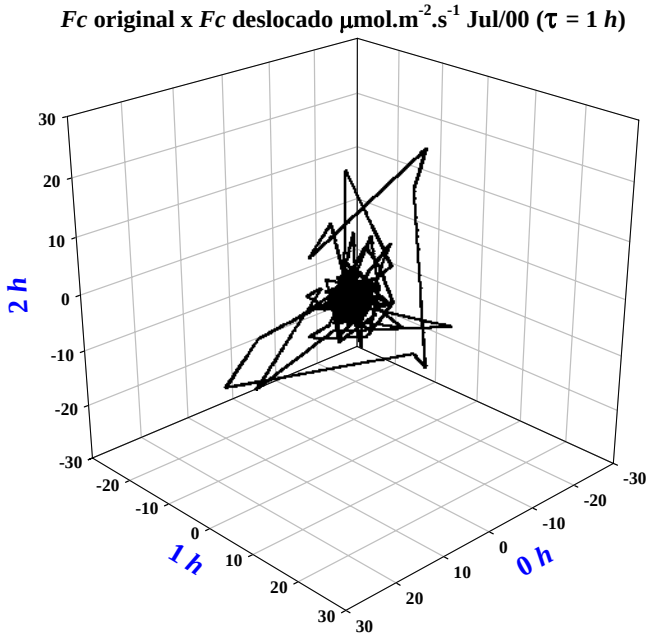


Figura 34. Perfil de fase da evolução temporal do Fluxo de CO_2 (*Fc*) para Jul/00 e τ = 1 *h*.

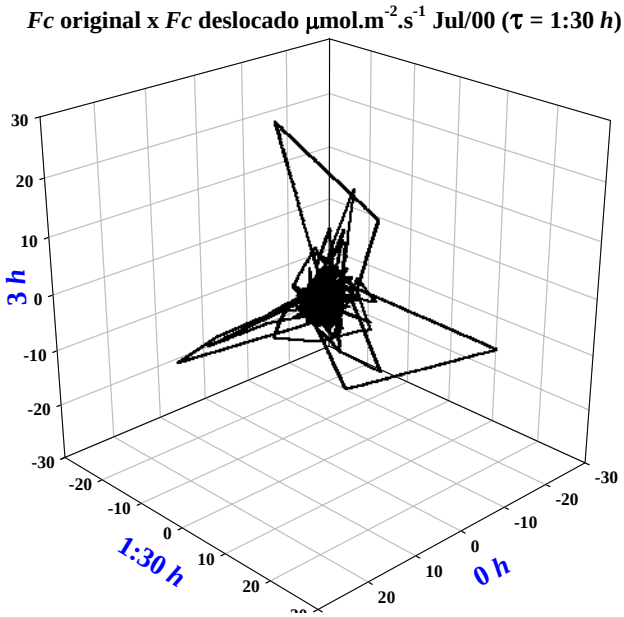


Figura 35. Perfil de fase da evolução temporal do Fluxo de CO_2 (*Fc*) para Jul/00 e τ = 1:30 *h*.

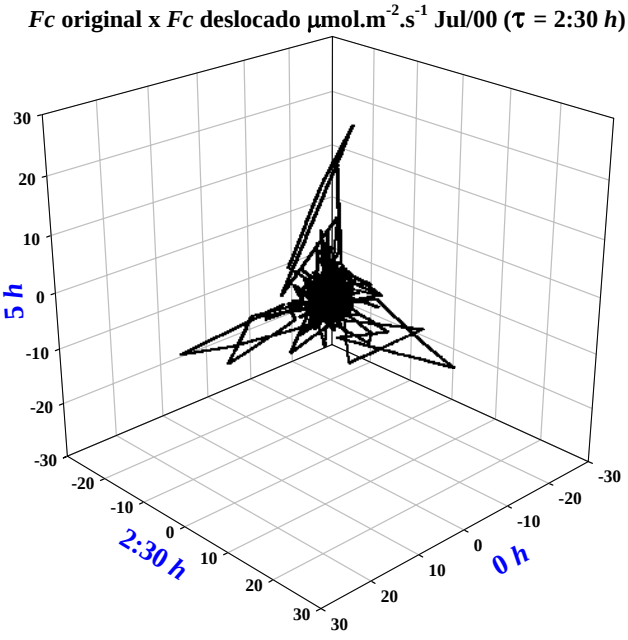


Figura 36. Perfil de fase da evolução temporal do Fluxo de CO_2 (*Fc*) para Jul/00 e τ = 2:30 *h*.

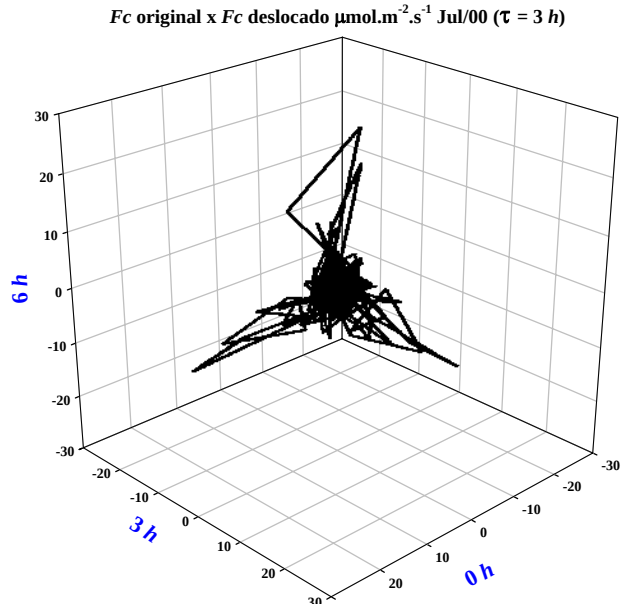


Figura 37. Perfil de fase da evolução temporal do Fluxo de CO_2 (*Fc*) para Jul/00 e τ = 3 *h*.

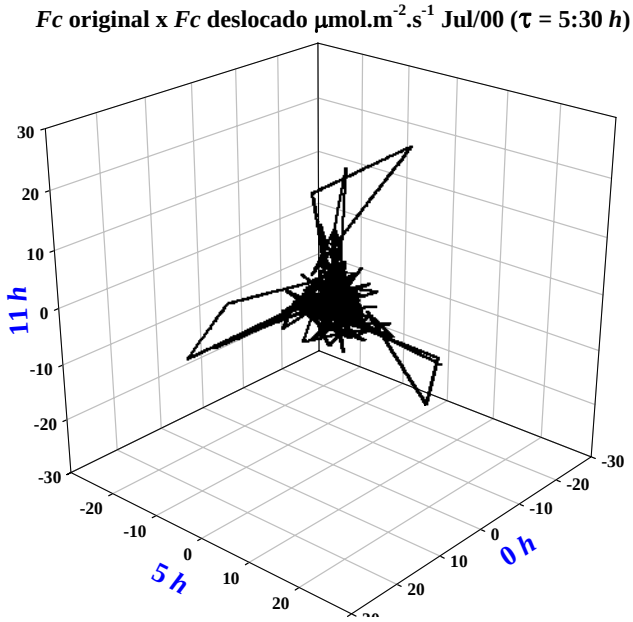


Figura 38. Perfil de fase da evolução temporal do Fluxo de CO_2 (*Fc*) para Jul/00 e τ = 5:30 *h*.

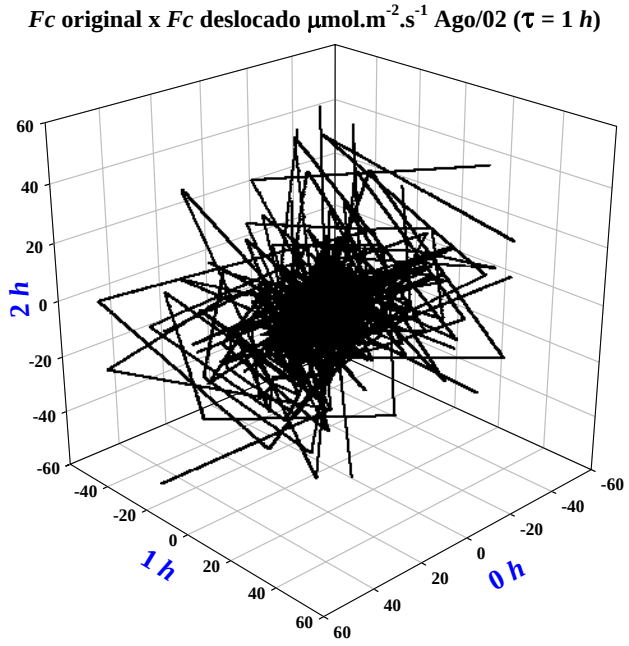


Figura 39. Perfil de fase da evolução temporal do Fluxo de CO_2 (*Fc*) para Ago/02 e τ = 1 *h*.

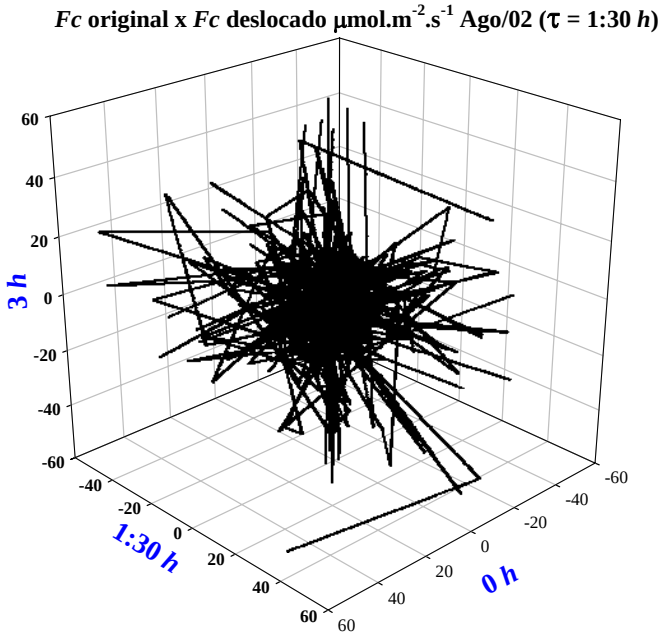


Figura 40. Perfil de fase da evolução temporal do Fluxo de CO_2 (*Fc*) para Ago/02 e τ = 1:30 *h*.

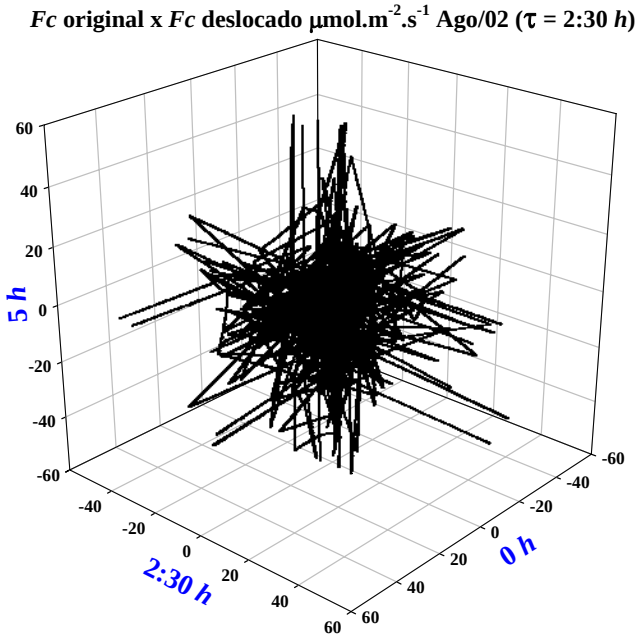


Figura 41. Perfil de fase da evolução temporal do Fluxo de CO_2 (*Fc*) para Ago/02 e τ = 2:30 *h*.

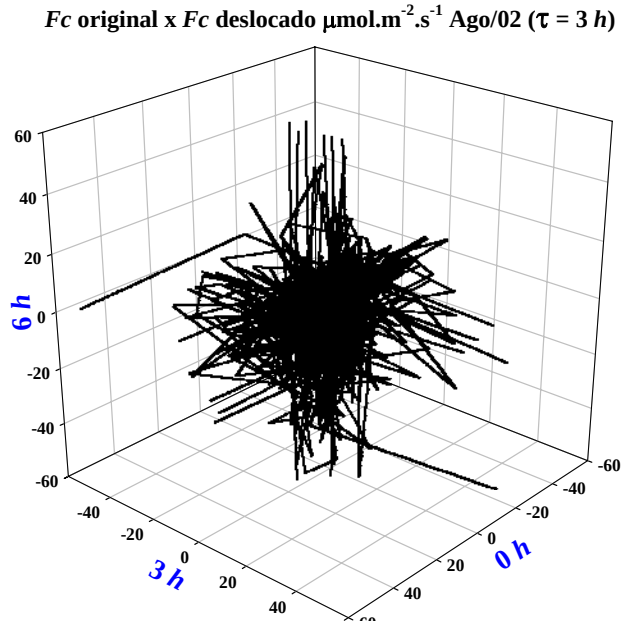


Figura 42. Perfil de fase da evolução temporal do Fluxo de CO_2 (*Fc*) para Ago/02 e τ = 3 *h*.

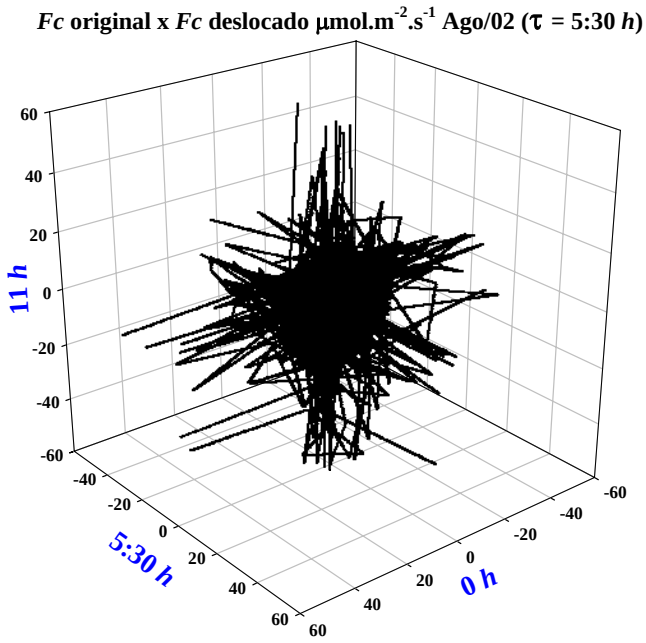


Figura 43. Perfil de fase da evolução temporal do Fluxo de CO_2 (*Fc*) para Ago/02 e τ = 5:30 *h*.

4.1.2. Resultados para o Fluxo de Calor Latente (*LE*)

A saturação da dimensionalidade (*d*) no Período Chuvoso de 2001 (Fev/01), para τ = 3 *h*, foi aproximadamente 1,5, conforme tabela 5 e figura 44. (b) e no Período Seco de 2001 (Jun/01), $d \cong 1{,}2$ conforme tabela 5 e figura 46. (b). No Período Intermediário Chuvoso Seco (Mai/02) e no Período Seco de 2002 (Ago/02), para τ = 3 *h*, o valor de saturação da dimensionalidade (*d*) foi aproximadamente 1,2 e 1,5, respectivamente, conforme mostrado na tabela 5 e figuras 48. (b) e 49. (b).

A menor saturação da dimensionalidade (*d*) ocorreu no Período Seco de 2001 (Jun/01), onde $d \cong 0{,}8$ para τ = 18:30 *h*, conforme tabela 5 e figura 47. (b). Para os demais períodos com τ = 18:30 *h*, o *d* se apresentou estável em aproximadamente 1,2, conforme tabela 5 e figuras 45. (b) e 50. (b).

Para todos os períodos, o número de variáveis do espaço de fase (n) variou entre 4 e 7. A tabela 5 apresenta os valores de n para todos os períodos. Pelas figuras 46. (b) e 47. (b) observou-se que n variou entre 4 e 6 no Período Seco de 2001

(Jun/01). Pela figura 48. (b) observou-se que *n* foi 6 no Período Intermediário Chuvoso Seco de 2002 (Mai/02). Pelas figuras 44. (b) e 45. (b) observou-se que *n* foi 7 no Período Chuvoso de 2001 (Fev/01). Pelas figuras 49. (b) e 50. (b) observou-se que *n* variou entre 6 e 7 no Período Seco de 2002 (Ago/02). Esses resultados mostraram que o número de variáveis que influenciaram o Fluxo de Calor Latente (*LE*) foi maior no Período Chuvoso de 2001 e Seco de 2002, do que no Período Seco de 2001 e Período Intermediário Chuvoso Seco de 2002.

As figuras de 51 a 65 representam o perfil do espaço de fase, para os períodos analisados, mostrando o local no espaço de fase em que os pontos se encontraram com maior freqüência, quando houve a estabilização dos dados, mostrando a região em que se encontra o atrator climático representado por esses dados.

Tabela 5. Fluxo de Calor Latente (*LE*) em relação à dimensionalidade do atrator (*d*), a defasagem (τ) e o número de variáveis do espaço de fase (*n*).

Variável	**Período**	**Mês/Ano**	***d***	**τ (horas)**	***n***
LE	Chuvoso	Fev/01	1,5	3:00	7
LE	Chuvoso	Fev/01	1,2	18:30	7
LE	Seco	Jun/01	1,2	3:00	6
LE	Seco	Jun/01	0,8	18:30	4
LE	Chuvoso Seco	Mai/02	1,2	3:00	6
LE	Seco	Ago/02	1,5	3:00	7
LE	Seco	Ago/02	1,2	18:30	6

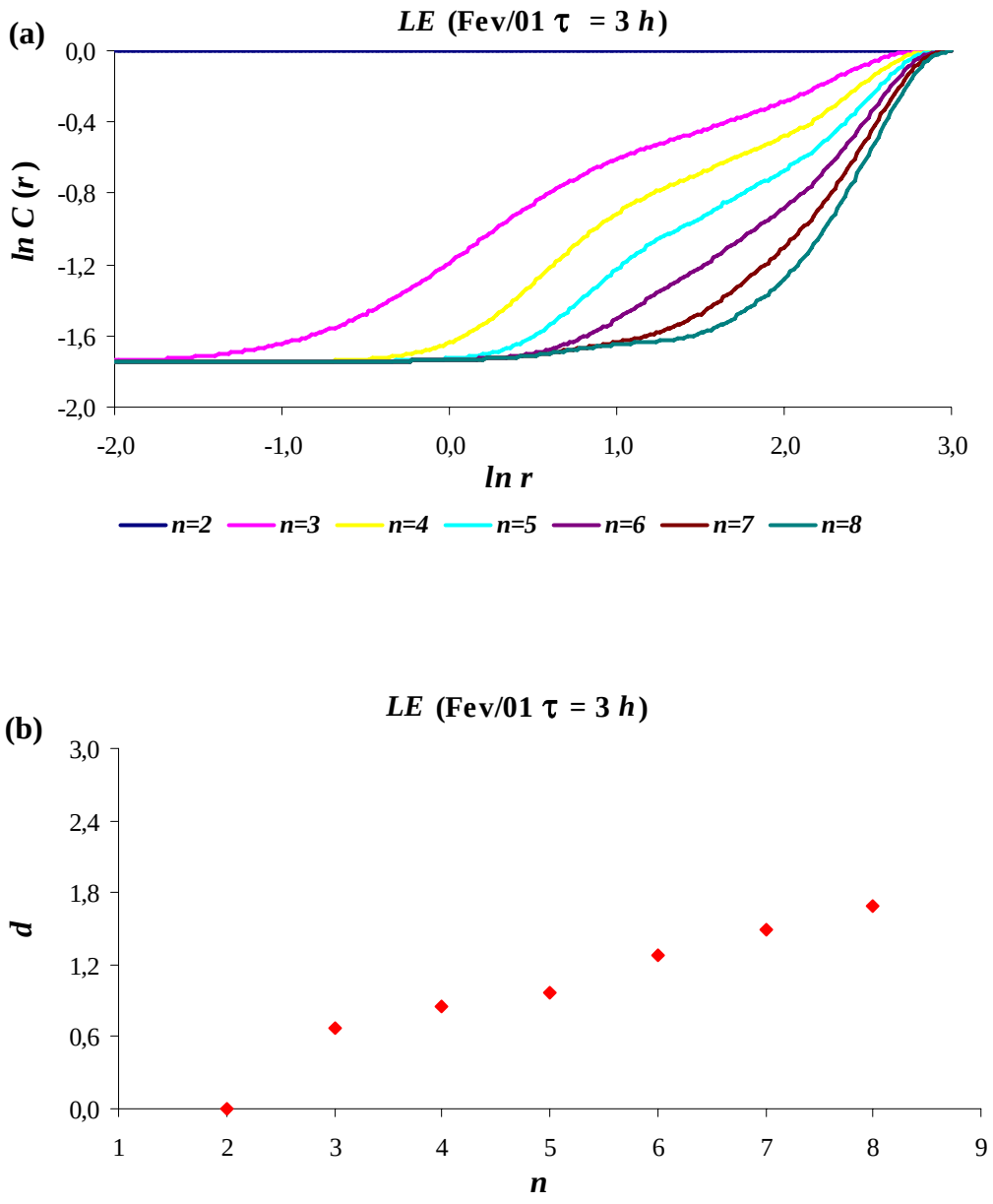


Figura 44. (a) Representação de *ln C*(*r*) *versus ln r* para o Fluxo de Calor Latente (*LE*) para o Período Chuvoso (Fev/01) e τ = 3 *h*. Dependência da dimensionalidade (*d*) em relação ao número das variáveis do espaço de fase (*n*).

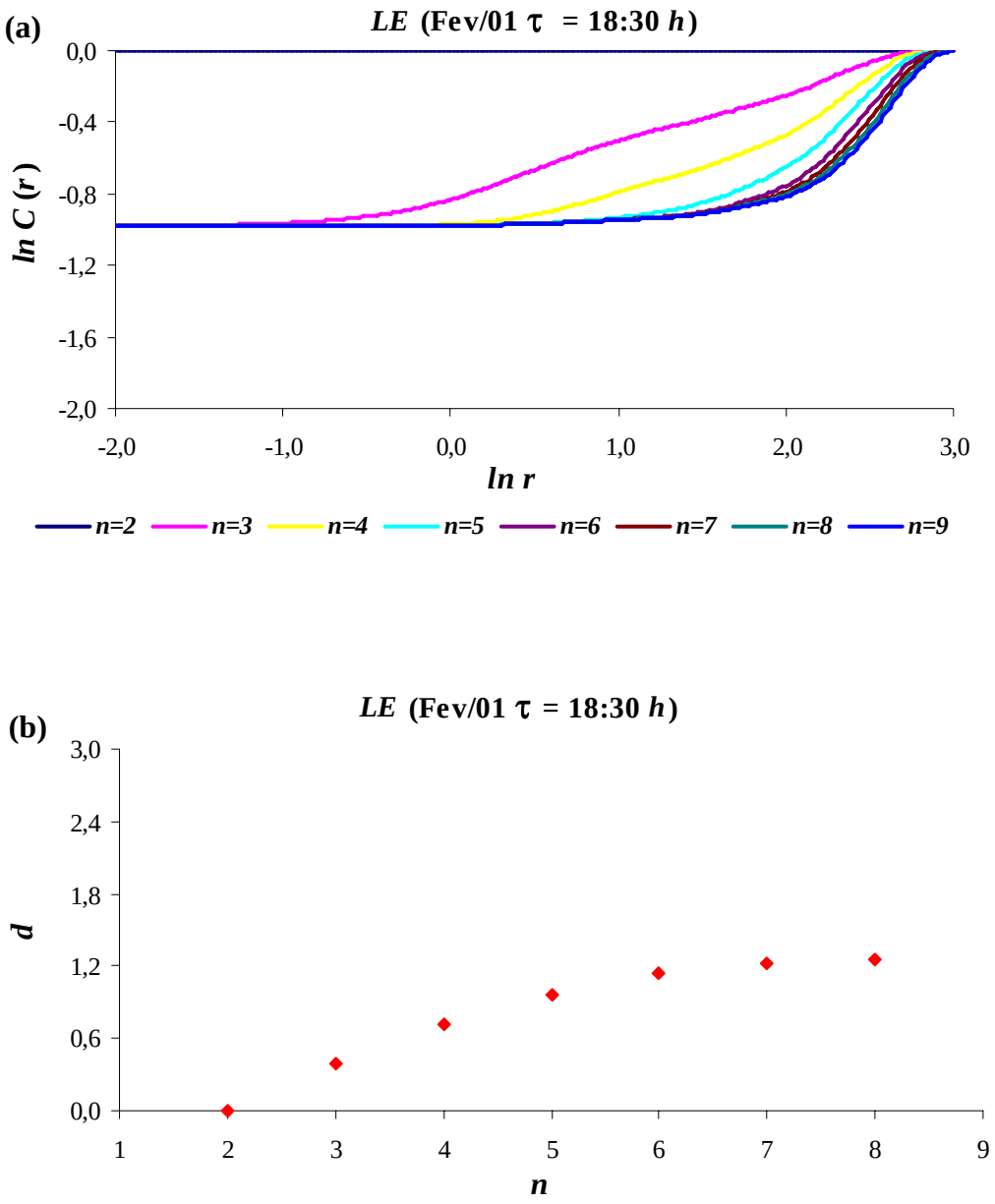


Figura 45. (a) Representação de *ln C*(*r*) *versus ln r* para o Fluxo de Calor Latente (*LE*) para o Período Chuvoso (Fev/01) e τ = 18:30 *h*. Dependência da dimensionalidade (*d*) em relação ao número das variáveis do espaço de fase (*n*).

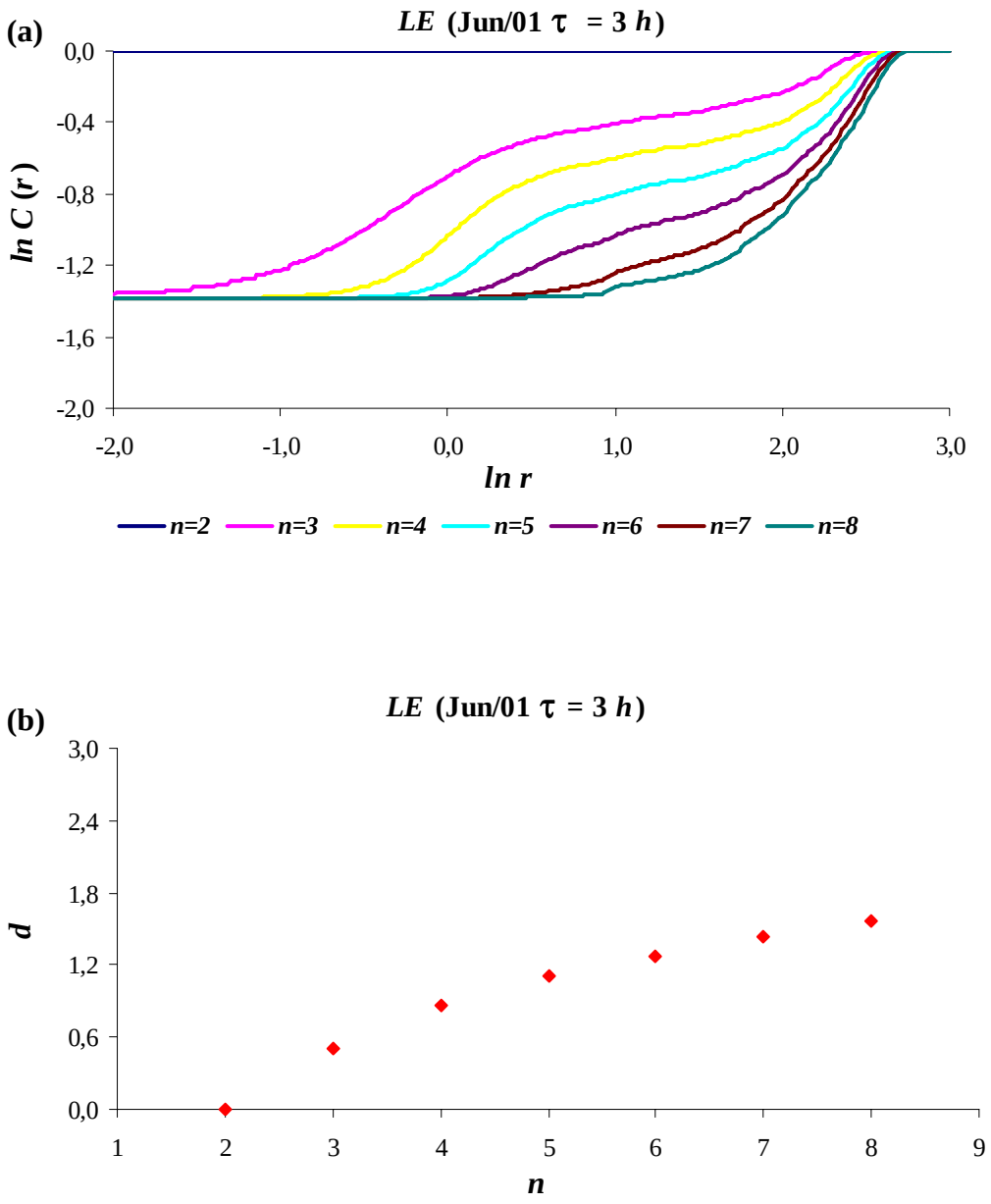


Figura 46. (a) Representação de *ln C*(*r*) *versus ln r* para o Fluxo de Calor Latente (*LE*) para o Período Seco (Jun/01) e τ = 3 *h*. (b) Dependência da dimensionalidade (*d*) em relação ao número das variáveis do espaço de fase (*n*).

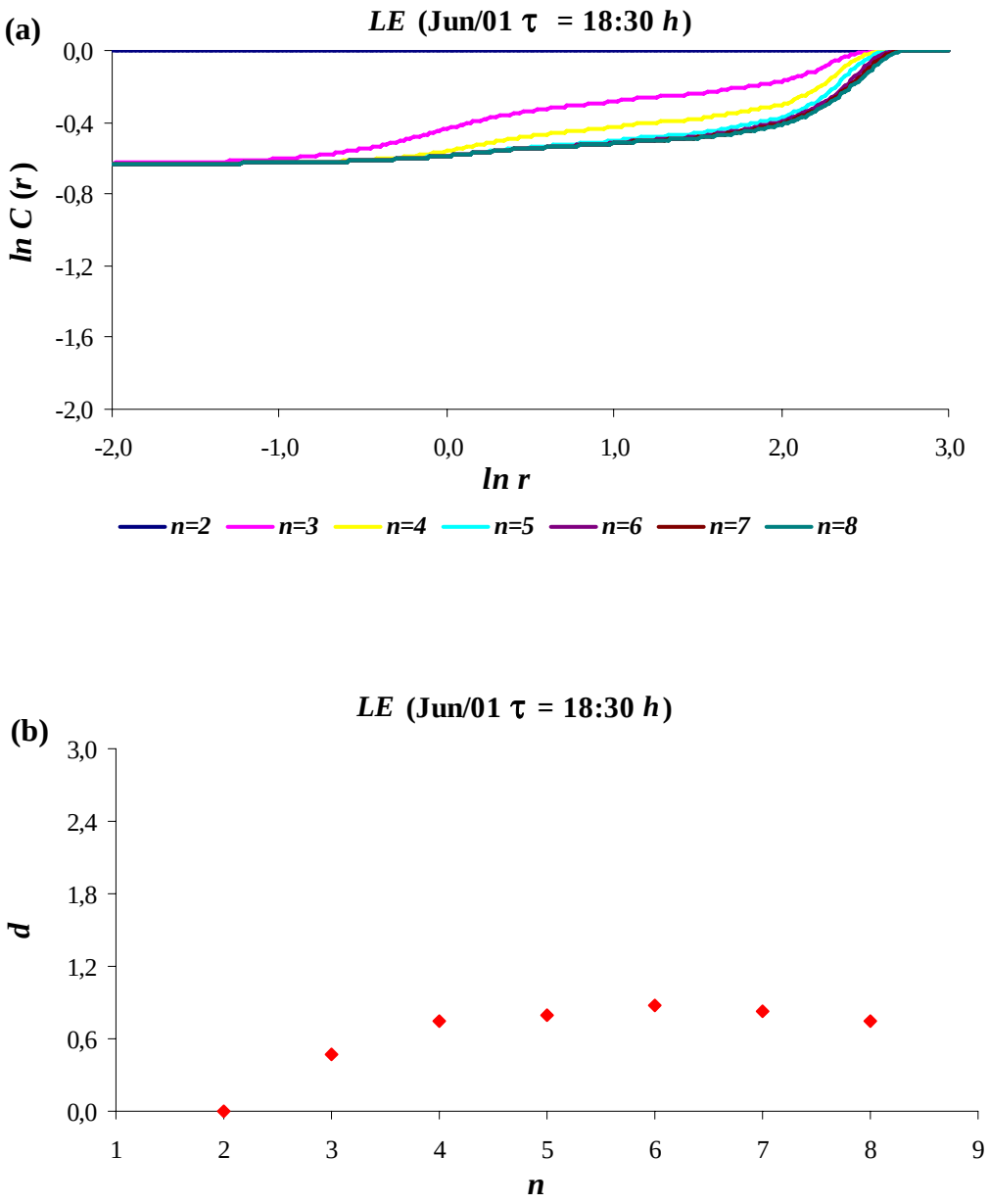


Figura 47. (a) Representação de *ln C*(*r*) *versus ln r* para o Fluxo de Calor Latente (*LE*) para o Período Seco (Jun/01) e τ = 18:30 *h*. Dependência da dimensionalidade (*d*) em relação ao número das variáveis do espaço de fase (*n*).

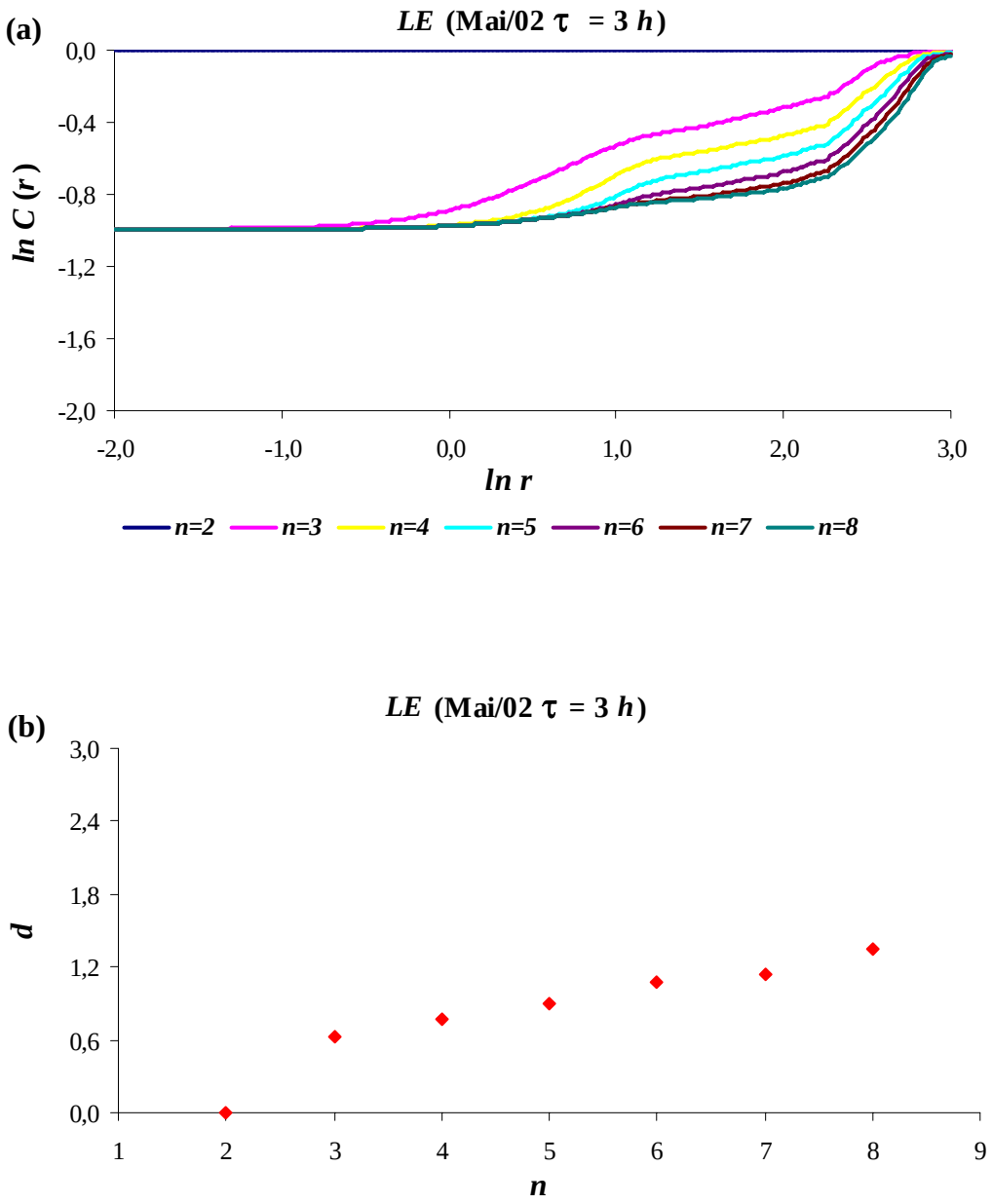


Figura 48. (a) Representação de *ln C*(*r*) *versus ln r* para o Fluxo de Calor Latente (*LE*) para o Período Intermediário Chuvoso Seco e τ = 3 *h*. Dependência da dimensionalidade (*d*) em relação ao número das variáveis do espaço de fase (*n*).

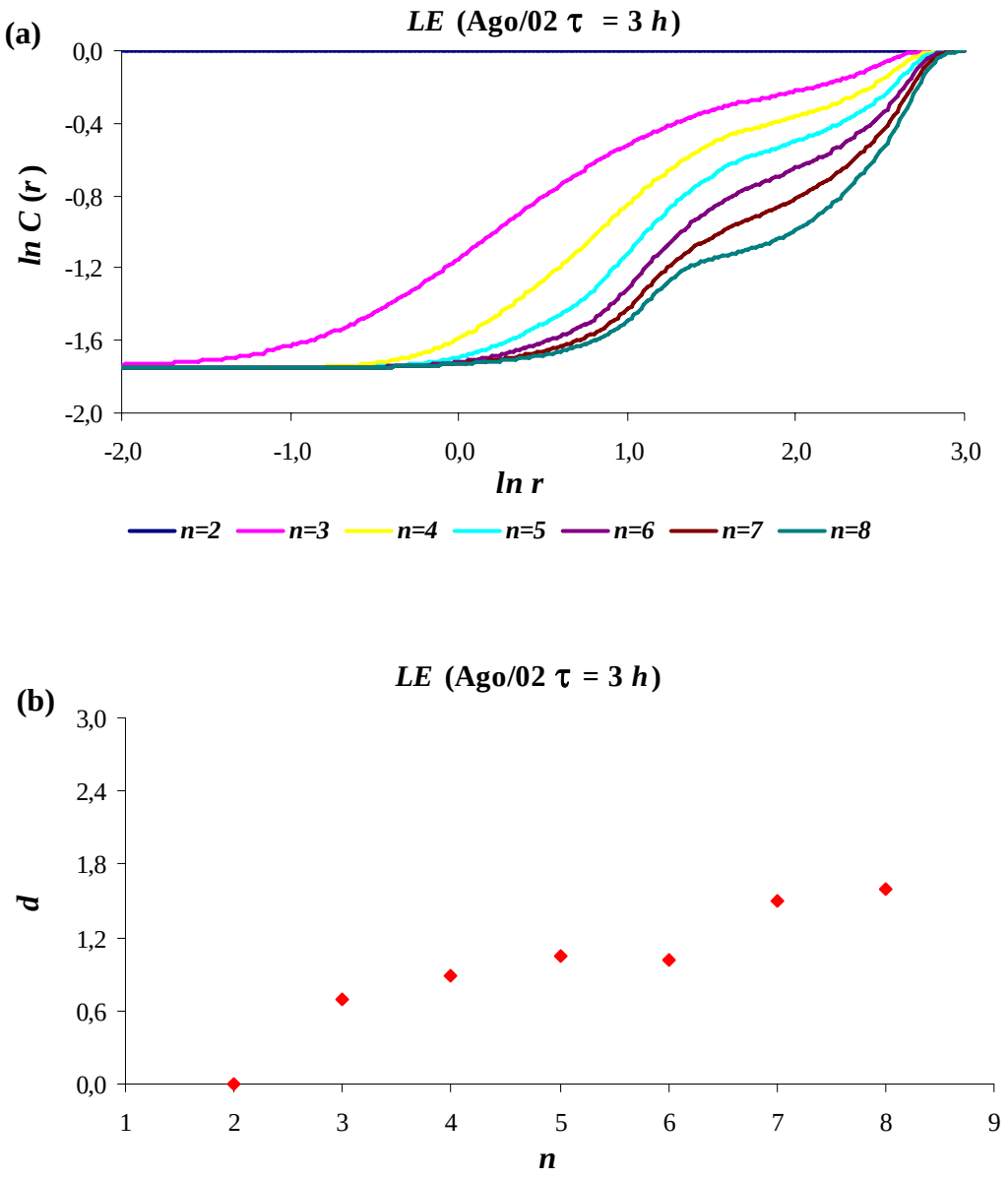


Figura 49. (a) Representação de *ln C*(*r*) *versus ln r* para o Fluxo de Calor Latente (*LE*) para o Período Seco (Ago/02) e τ = 3 *h*. Dependência da dimensionalidade (*d*) em relação ao número das variáveis do espaço de fase (*n*).

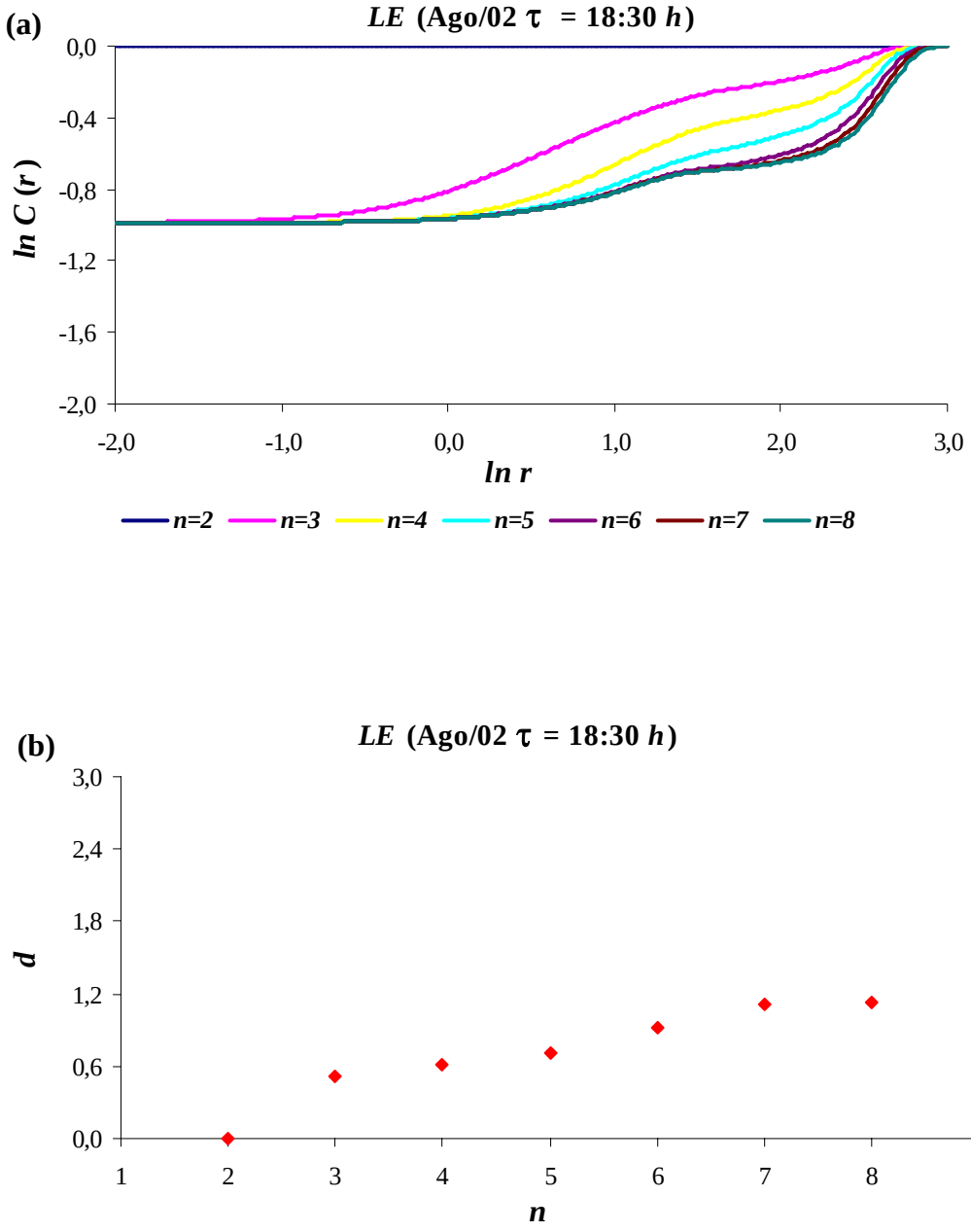


Figura 50. (a) Representação de *ln C*(*r*) *versus ln r* para o Fluxo de Calor Latente (*LE*) para o Período Seco (Ago/02) e τ = 18:30 *h*. Dependência da dimensionalidade (*d*) em relação ao número das variáveis do espaço de fase (*n*).

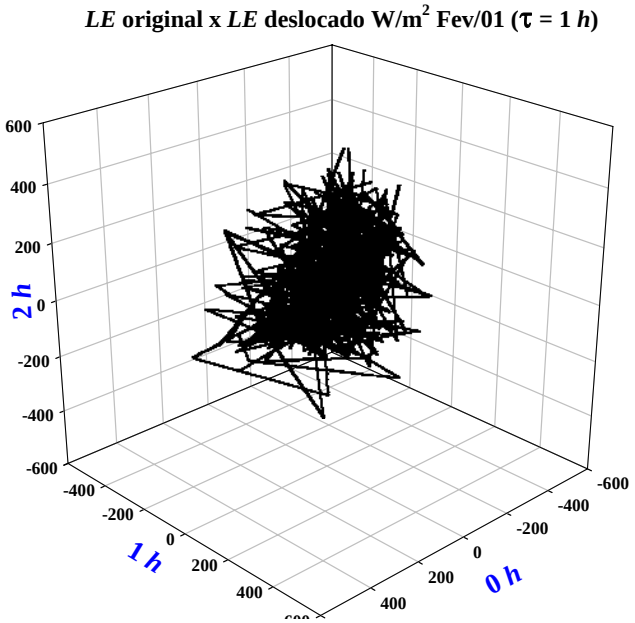


Figura 51. Perfil de fase da evolução temporal do Fluxo de Calor Latente (*LE*) para Fev/01 e τ = 1 *h*.

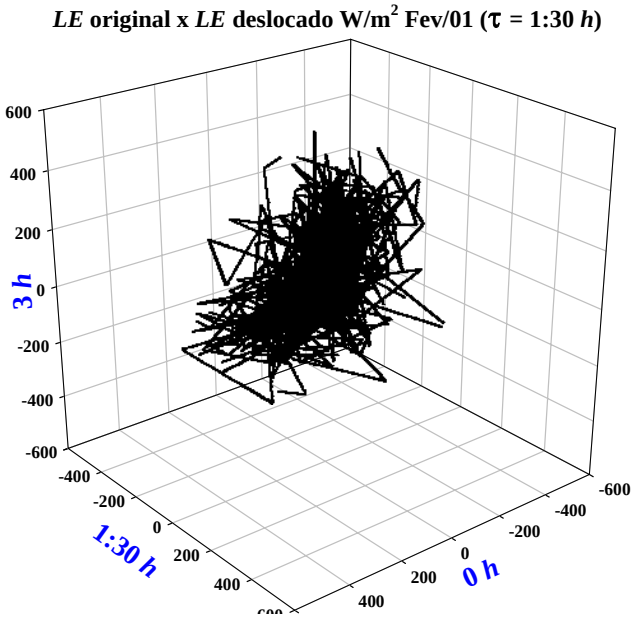


Figura 52. Perfil de fase da evolução temporal do Fluxo de Calor Latente (*LE*) para Fev/01 e τ = 1:30 *h*.

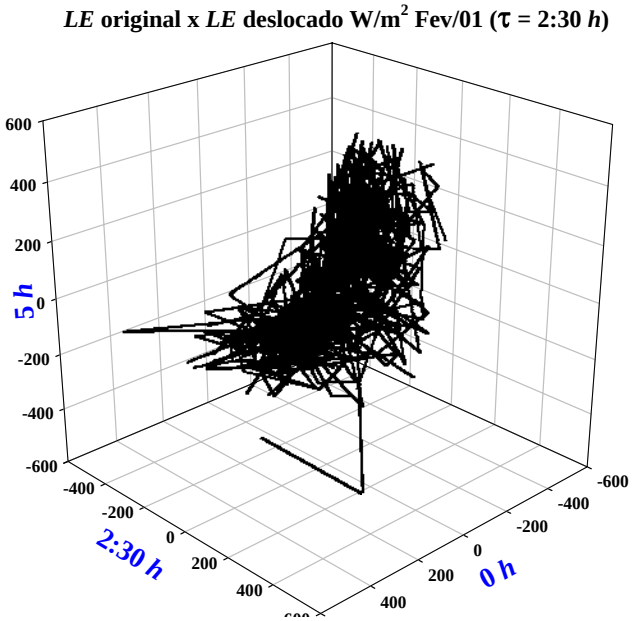


Figura 53. Perfil de fase da evolução temporal do Fluxo de Calor Latente (*LE*) para Fev/01 e τ = 2:30 *h*.

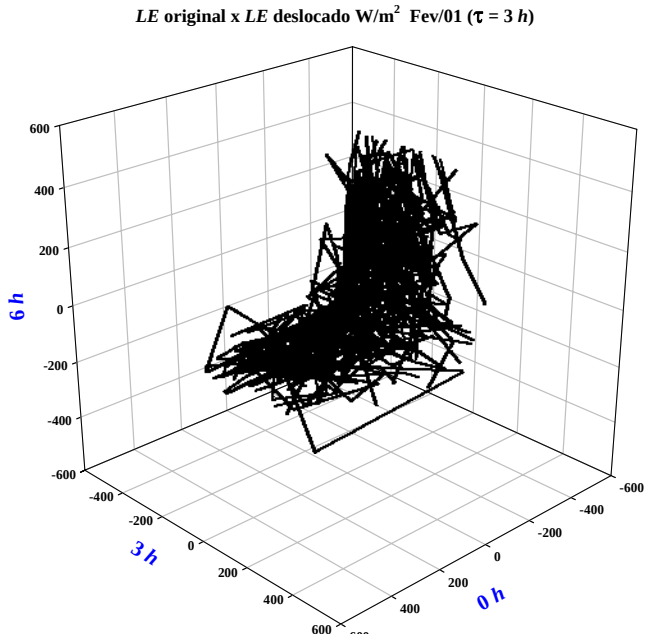


Figura 54. Perfil de fase da evolução temporal do Fluxo de Calor Latente (*LE*) para Fev/01 e τ = 3 *h*.

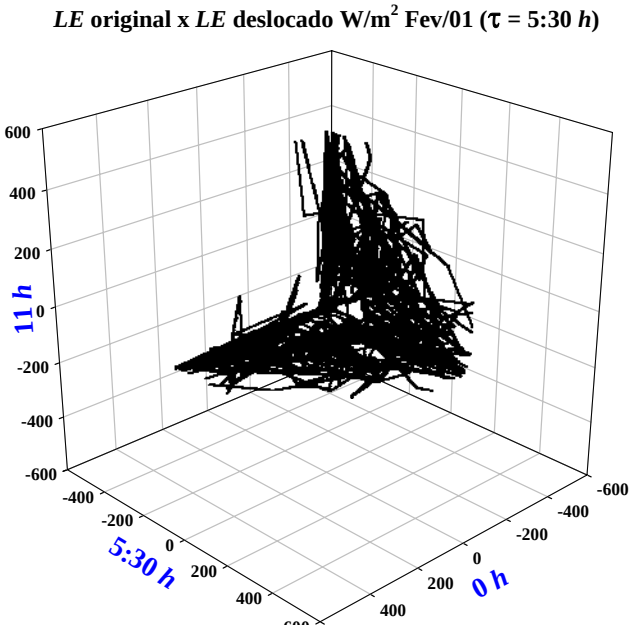


Figura 55. Perfil de fase da evolução temporal do Fluxo de Calor Latente (*LE*) para Fev/01 e τ = 5:30 *h*.

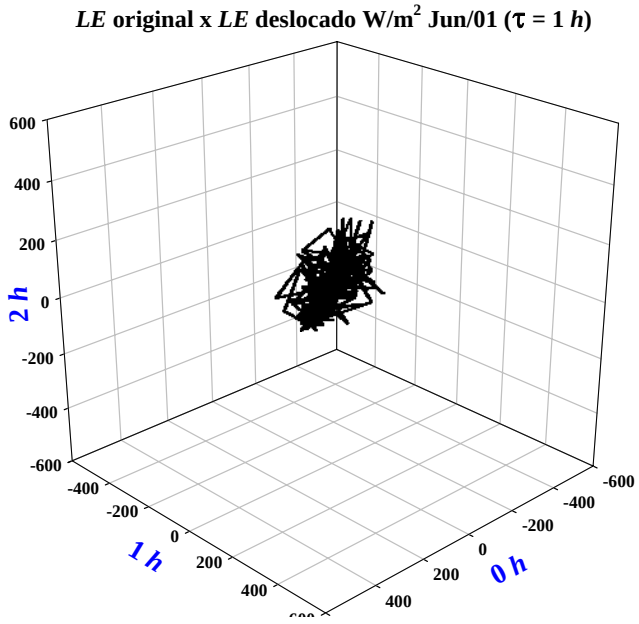


Figura 56. Perfil de fase da evolução temporal do Fluxo de Calor Latente (*LE*) para Jun/01 e τ = 1 *h*.

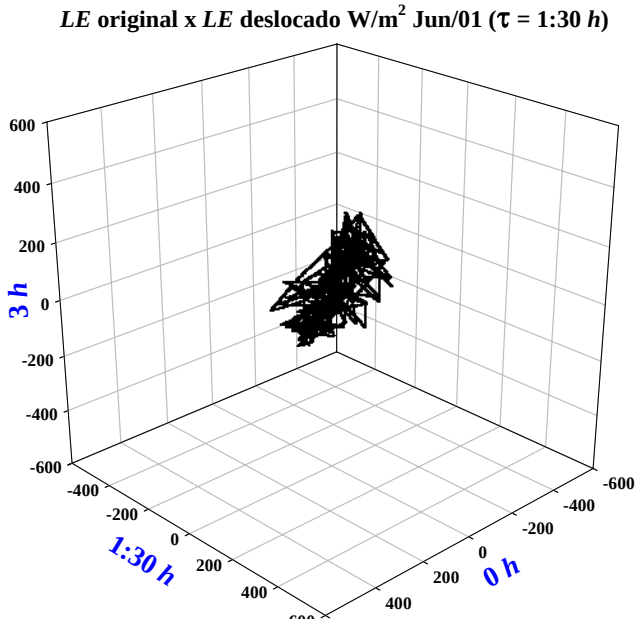


Figura 57. Perfil de fase da evolução temporal do Fluxo de Calor Latente (*LE*) para Jun/01 e τ = 1:30 *h*.

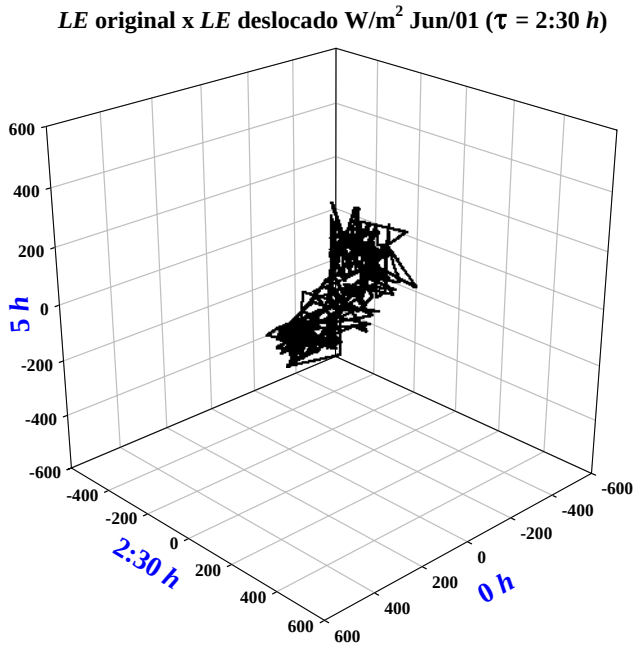


Figura 58. Perfil de fase da evolução temporal do Fluxo de Calor Latente (*LE*) para Jun/01 e τ = 2:30 *h*.

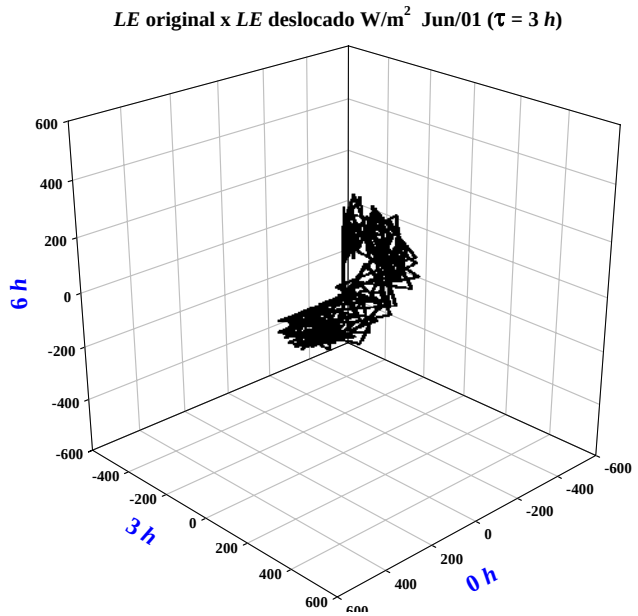


Figura 59. Perfil de fase da evolução temporal do Fluxo de Calor Latente (*LE*) para Jun/01 e τ = 3 *h*.

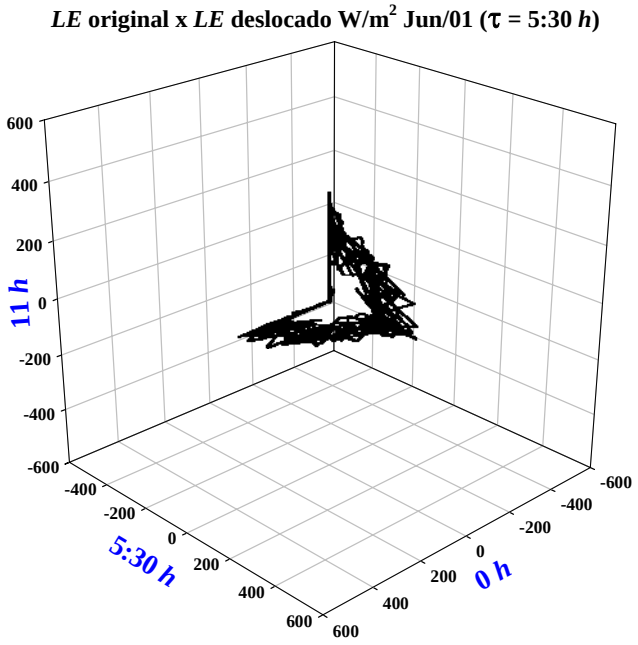


Figura 60. Perfil de fase da evolução temporal do Fluxo de Calor Latente (*LE*) para Jun/01 e τ = 5:30 *h*.

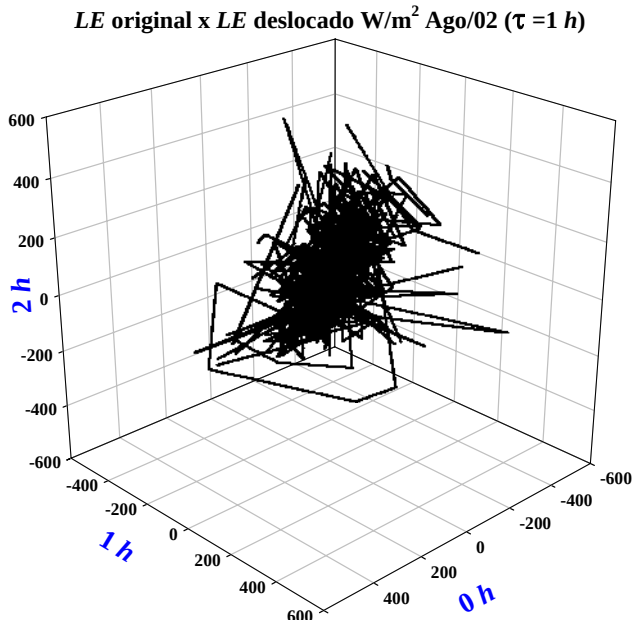


Figura 61. Perfil de fase da evolução temporal do Fluxo de Calor Latente (*LE*) para Ago/02 e τ = 1 *h*.

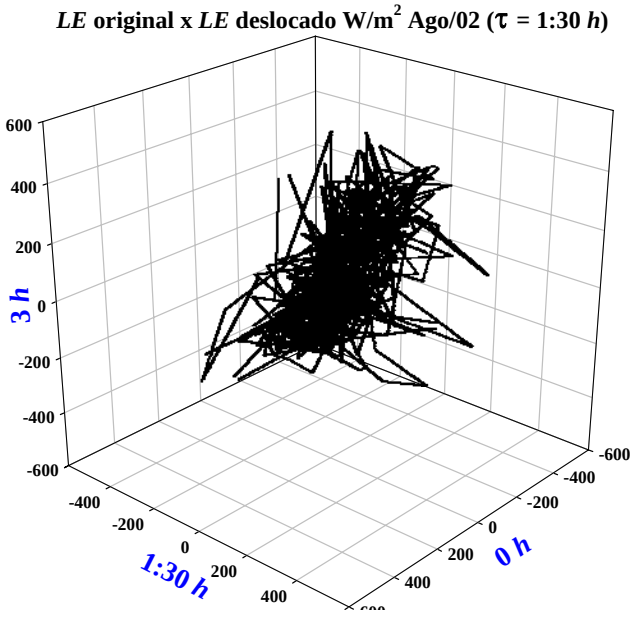


Figura 62. Perfil de fase da evolução temporal do Fluxo de Calor Latente (*LE*) para Ago/02 e τ = 1:30 *h*.

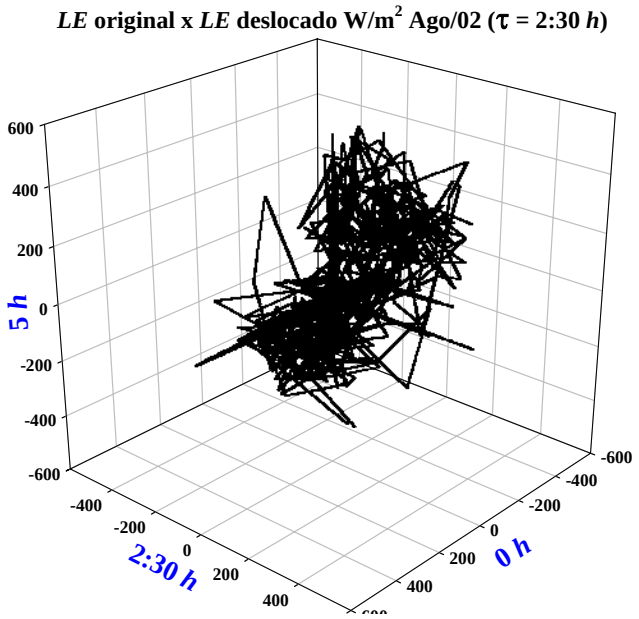


Figura 63. Perfil de fase da evolução temporal do Fluxo de Calor Latente (*LE*) para Ago/02 e τ = 2:30 *h*.

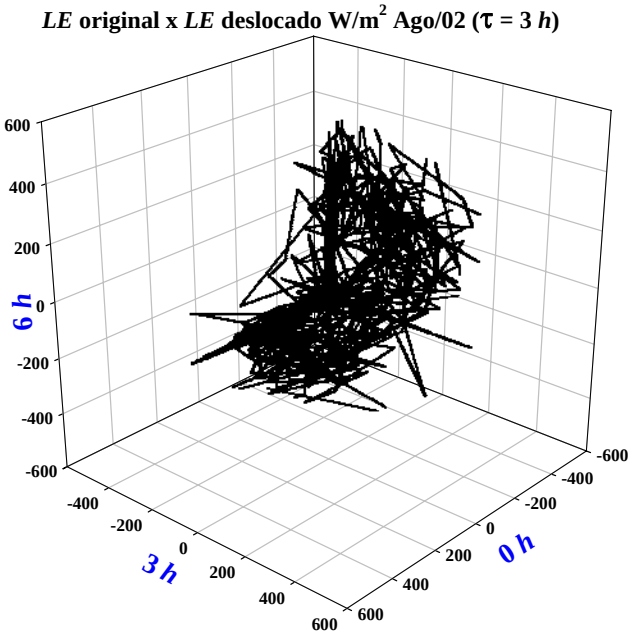


Figura 64. Perfil de fase da evolução temporal do Fluxo de Calor Latente (*LE*) para Ago/02 e τ = 3 *h*.

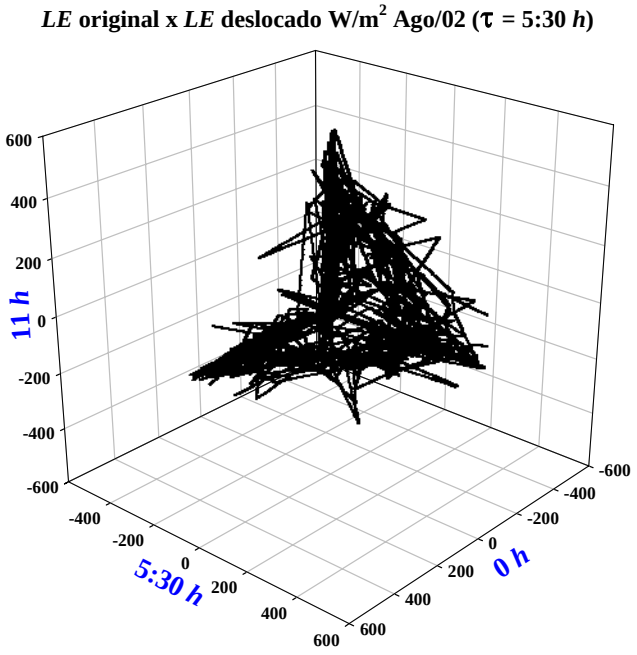


Figura 65. Perfil de fase da evolução temporal do Fluxo de Calor Latente (*LE*) para Ago/02 e τ = 5:30 *h*.

4.1.3. Resultados para o Fluxo de Calor Sensível (*H*)

Para o Fluxo de Calor Sensível (*H*), com τ = 18:30 *h* o menor valor da dimensionalidade (*d*), ocorreu no Período Seco de 2001 (Jun/01), de acordo com tabela 6 e figura 69. (b) e foi aproximadamente 0,8. Para o Período Seco de 2002 (Ago/02) conforme pode ser visto na tabela 6 e figuras 71. (b) $d \cong 1{,}4$. Para os Períodos Chuvosos (Fev/01 e Dez/02) *d* apresentou-se constante em aproximadamente 1,4, conforme figuras 67. (b) e 73. (b), respectivamente.

Para τ = 18:30 *h*, o número de variáveis do espaço de fase (*n*) apresentado na tabela 6 foi constante em 7, para os Períodos Chuvosos de 2001 e 2002 (Fev/01 e Dez/02), conforme figuras 67. (b) e 73. (b) e no Período Seco de 2002 (Ago/02), conforme figura 71. (b). Já no Período Seco de 2001 (Jun/01), *n* foi igual a 6, conforme figura 69. (b).

Para τ = 3 *h*, a variação da dimensionalidade do atrator (*d*), variou de aproximadamente 1,2 a 1,4; sendo a menor dimensionalidade no Período Chuvoso de 2001 (Fev/01), com *n* = 1,2 como pode ser visto na tabela 6 e figura 66. (b) e a maior

dimensionalidade no Período Seco de 2002 (Ago/02), *n* = 1,4, conforme tabela 6 e figura 70.(b). No Período Chuvoso de 2002 (Dez/02) e Seco de 2001 (Jun/01), o valor da dimensionalidade ficou constante em aproximadamente 1,3, conforme tabela 6 e figuras 68. (b) e 72. (b).

Para τ = 3 *h*, o *n* foi de 6 e 7, para os Períodos Chuvoso e Seco de 2001 (Fev/01 e Jun/01), respectivamente, como pode ser visto na tabela 6 e figuras 66. (b) e 68. (b). Para o Período Seco de 2002 (Ago/02), *n* foi representado por 4 variáveis e para o Período Chuvoso de 2002 (Dez/02), *n* foi representado por 5 variáveis, conforme tabela 6 e figuras 70. (b) e 72. (b).

As figuras de 74 a 93 mostram o perfil de fase, representando a evolução temporal para algumas defasagens (τ) referentes aos períodos analisados. Essas figuras foram colocadas em um espaço tridimensional, para que se tenha uma visão mais clara de como os dados se comportam e a região do espaço de fase que eles se encontram com maior freqüência, ou seja, onde existe um atrator.

Tabela 6. Fluxo de Calor Sensível (*H*) em relação à dimensionalidade do atrator (*d*), a defasagem (τ) e o número de variáveis do espaço de fase (*n*).

Variável	**Período**	**Mês/Ano**	***d***	**τ (horas)**	***n***
H	Chuvoso	Fev/01	1,2	3:00	6
H	Chuvoso	Fev/01	1,4	18:30	7
H	Seco	Jun/01	1,3	3:00	7
H	Seco	Jun/01	0,8	18:30	6
H	Seco	Ago/02	1,3	3:00	4
H	Seco	Ago/02	1,4	18:30	7
H	Chuvoso	Dez/02	1,4	3:00	5
H	Chuvoso	Dez/02	1,4	18:30	7

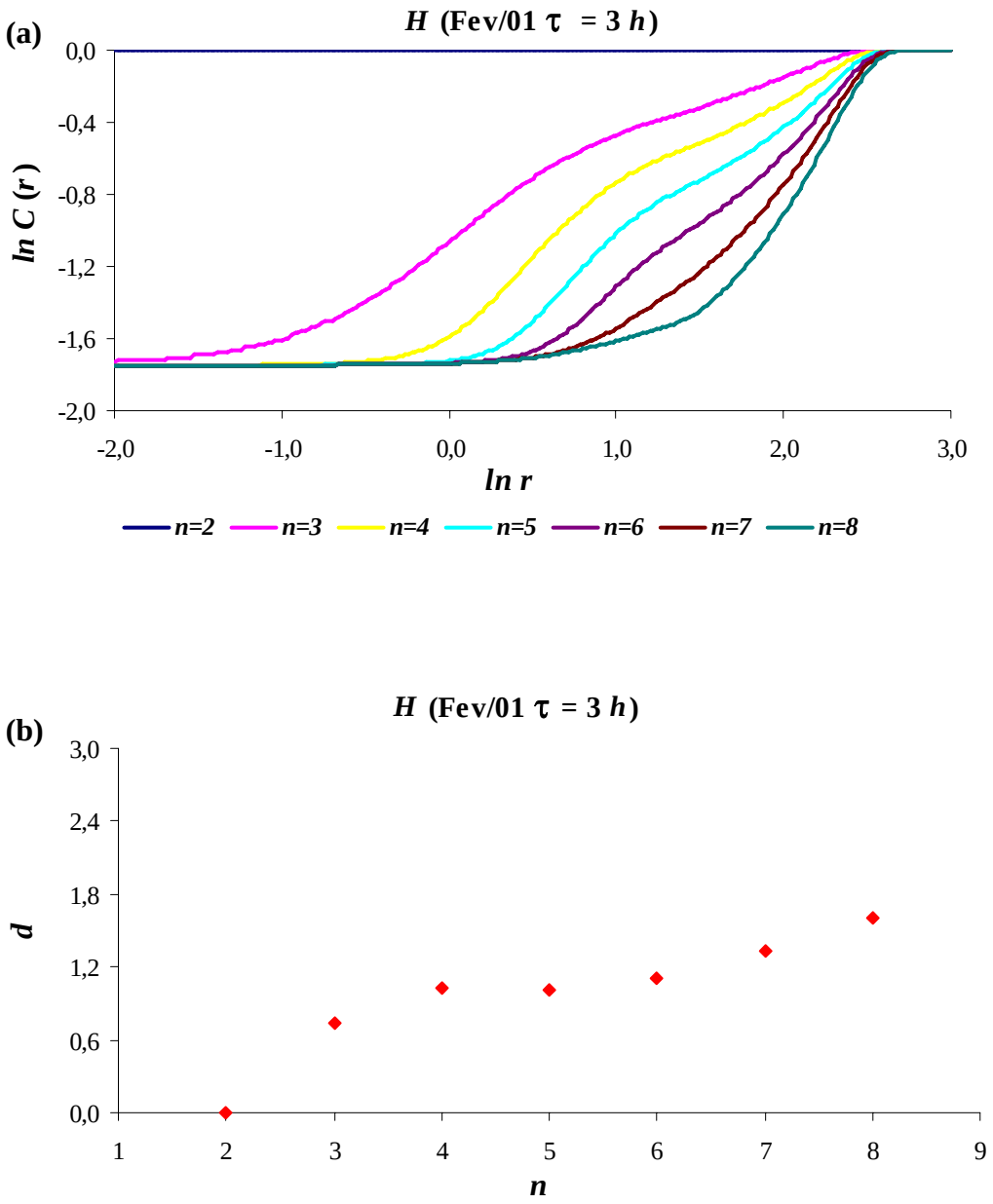


Figura 66. (a) Representação de *ln C*(*r*) *versus ln r* para o Fluxo de Calor Sensível (*H*) para o Período Chuvoso (Fev/01) e τ = 3 *h*. Dependência da dimensionalidade (*d*) em relação ao número das variáveis do espaço de fase (*n*).

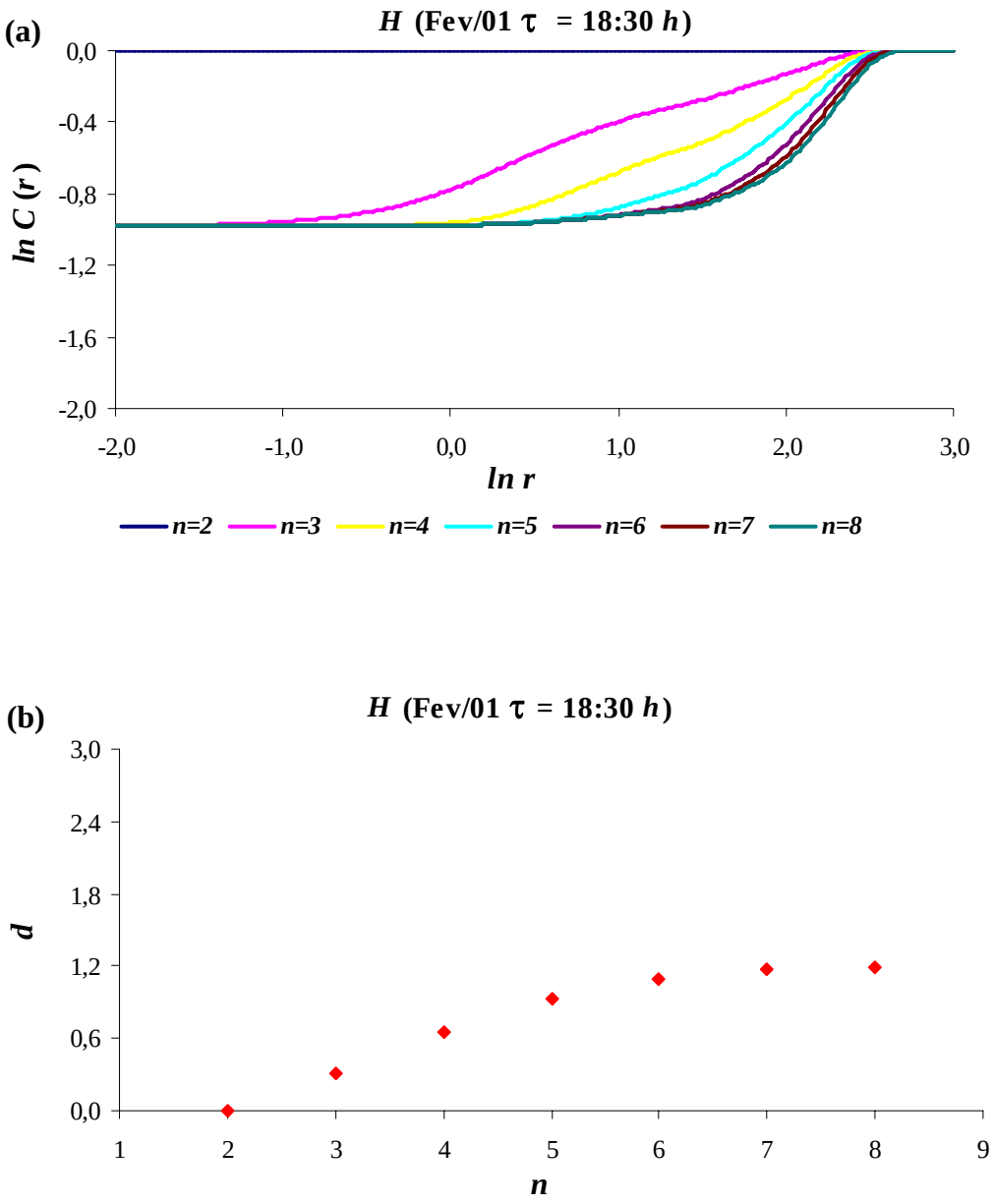


Figura 67. (a) Representação de *ln C*(*r*) *versus ln r* para o Fluxo de Calor Sensível (*H*) para o Período Chuvoso (Fev/01) e τ = 18:30 *h*. (b) Dependência da dimensionalidade (*d*) em relação ao número das variáveis do espaço de fase (*n*).

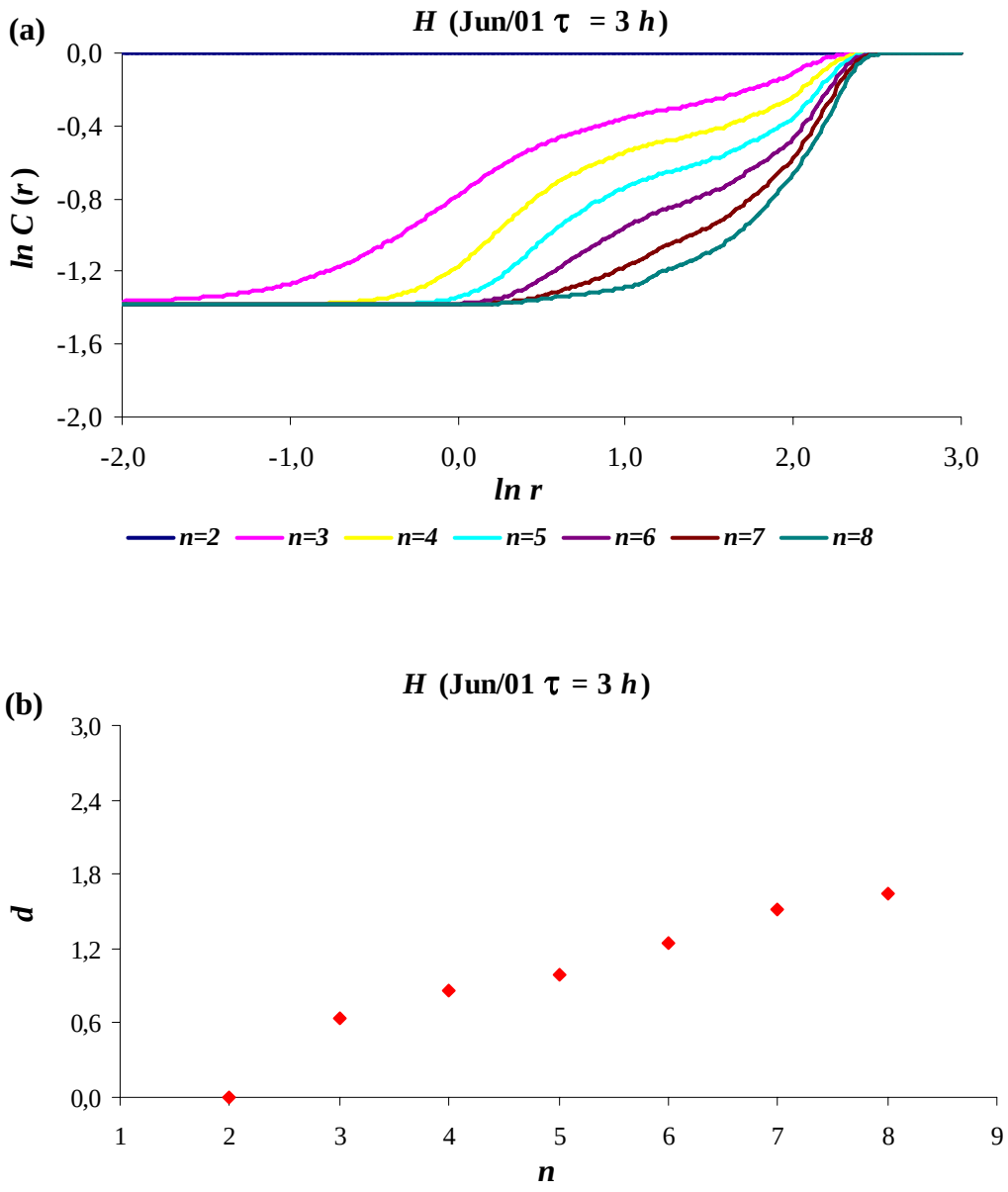


Figura 68. (a) Representação de *ln C*(*r*) *versus ln r* para o Fluxo de Calor Sensível (*H*) para o Período Seco (Jun/01) e τ = 3 *h*. (b) Dependência da dimensionalidade (*d*) em relação ao número das variáveis do espaço de fase (*n*).

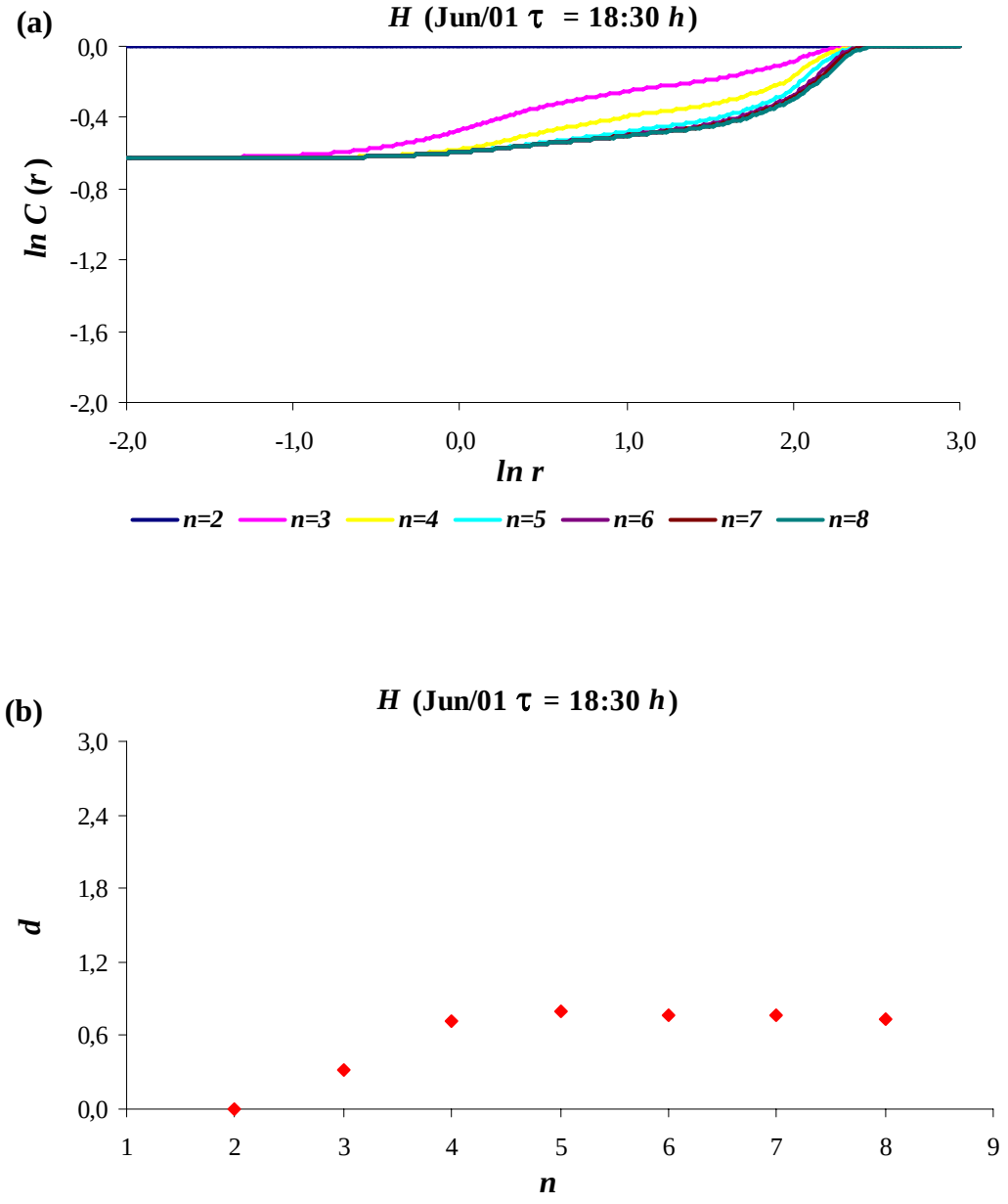


Figura 69. (a) Representação de *ln C*(*r*) *versus ln r* para o Fluxo de Calor Sensível (*H*) para o Período Seco (Jun/01) e τ = 18:30 *h*. (b) Dependência da dimensionalidade (*d*) em relação ao número das variáveis do espaço de fase (*n*).

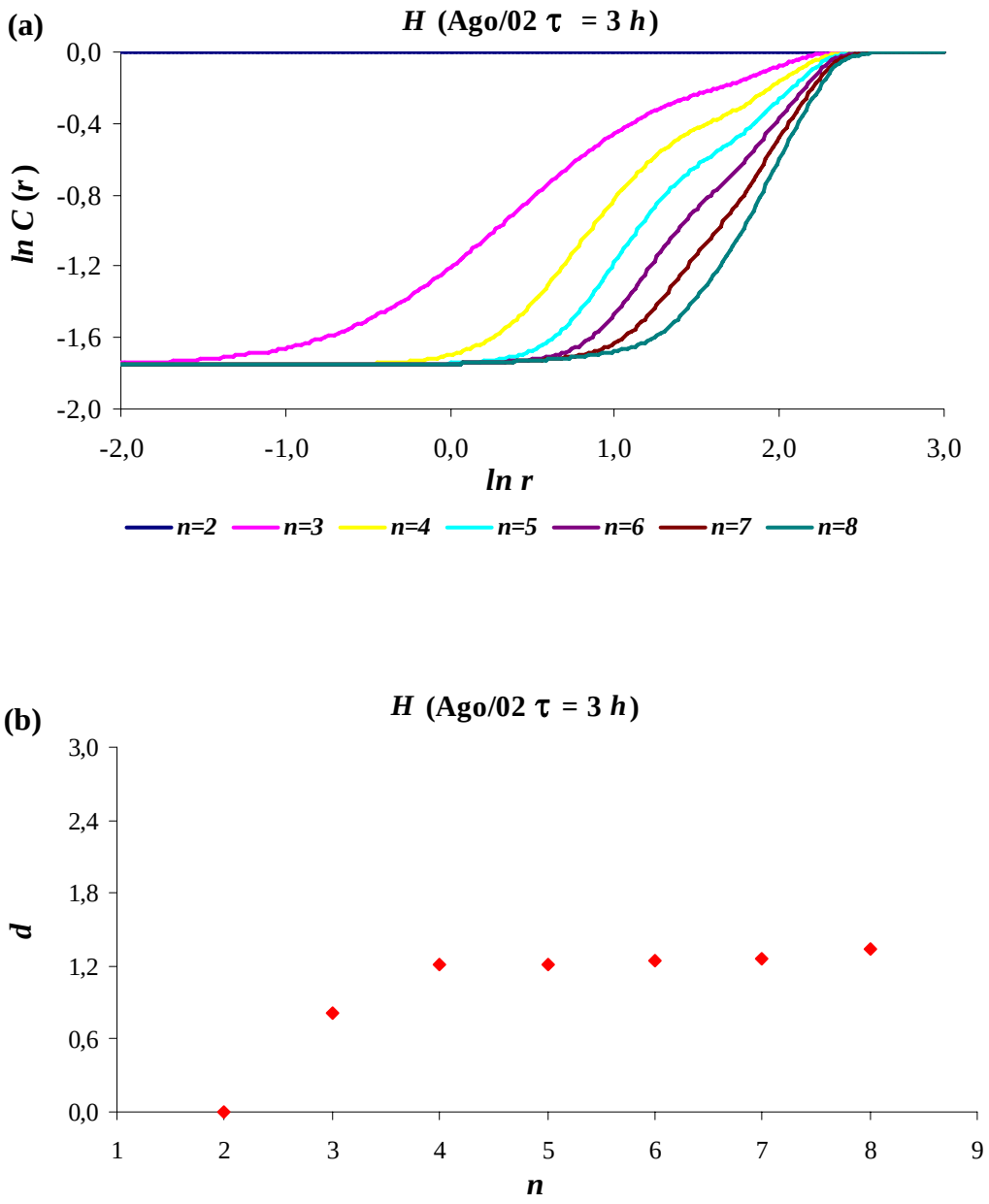


Figura 70. (a) Representação de *ln C*(*r*) *versus ln r* para o Fluxo de Calor Sensível (*H*) para o Período Seco (Ago/02) e τ = 3 *h*. (b) Dependência da dimensionalidade (*d*) em relação ao número das variáveis do espaço de fase (*n*).

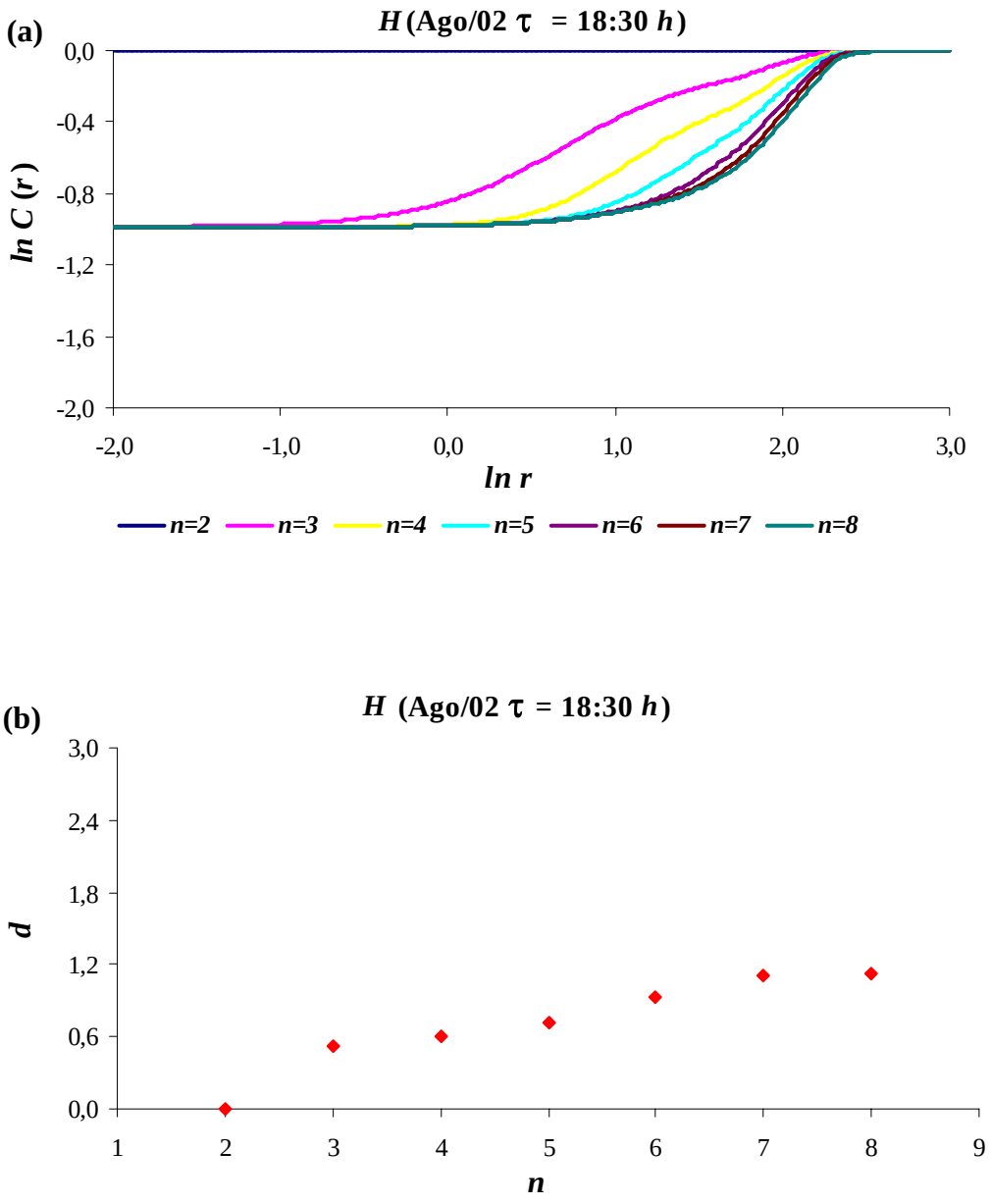


Figura 71. (a) Representação de *ln C*(*r*) *versus ln r* para o Fluxo de Calor Sensível (*H*) para o Período Seco (Ago/02) e τ = 18:30 *h*. (b) Dependência da dimensionalidade (*d*) em relação ao número das variáveis do espaço de fase (*n*).

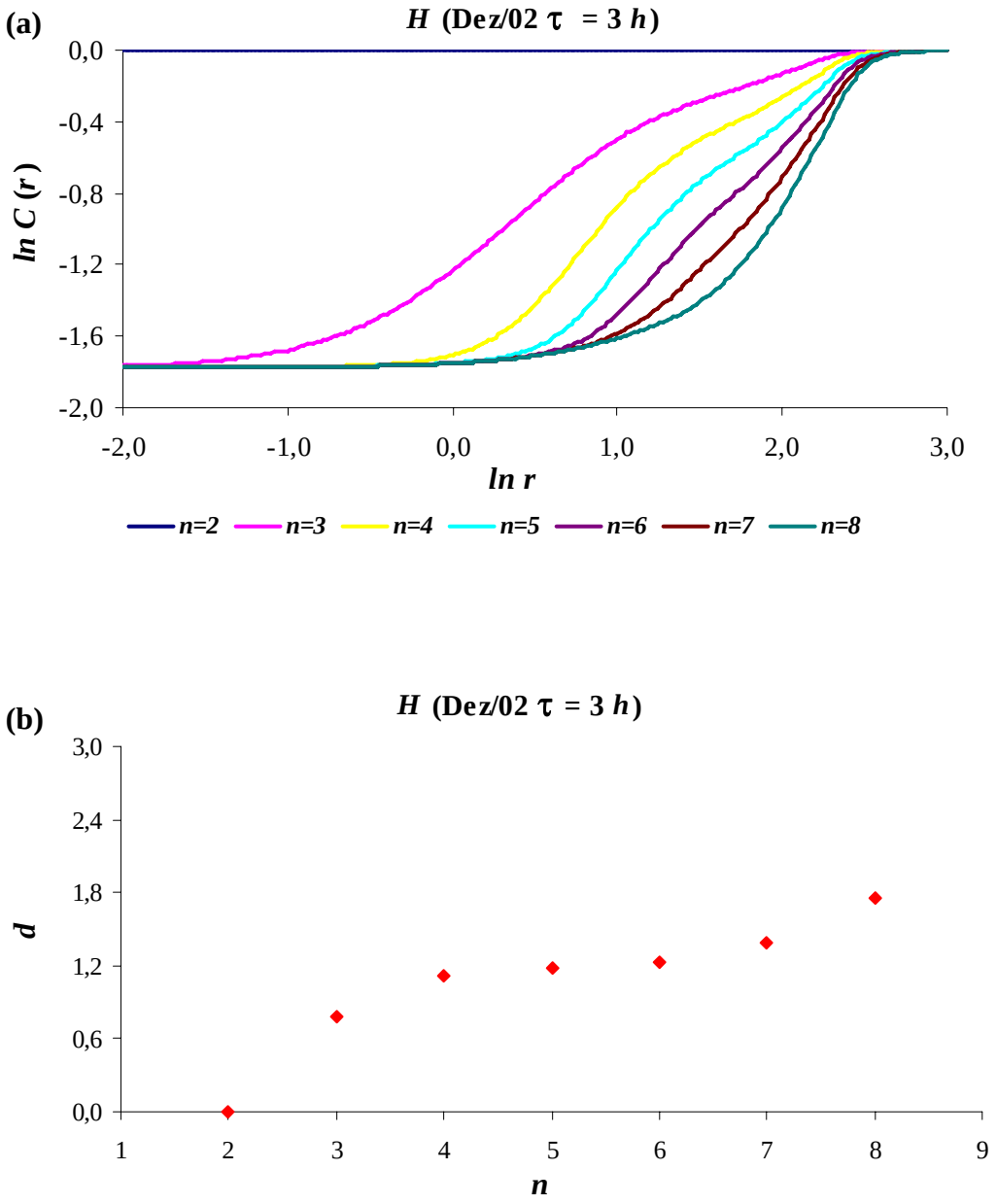


Figura 72. (a) Representação de *ln C*(*r*) *versus ln r* para o Fluxo de Calor Sensível (*H*) para o Período Chuvoso (Dez/02) e τ = 3 *h*. (b) Dependência da dimensionalidade (*d*) em relação ao número das variáveis do espaço de fase (*n*).

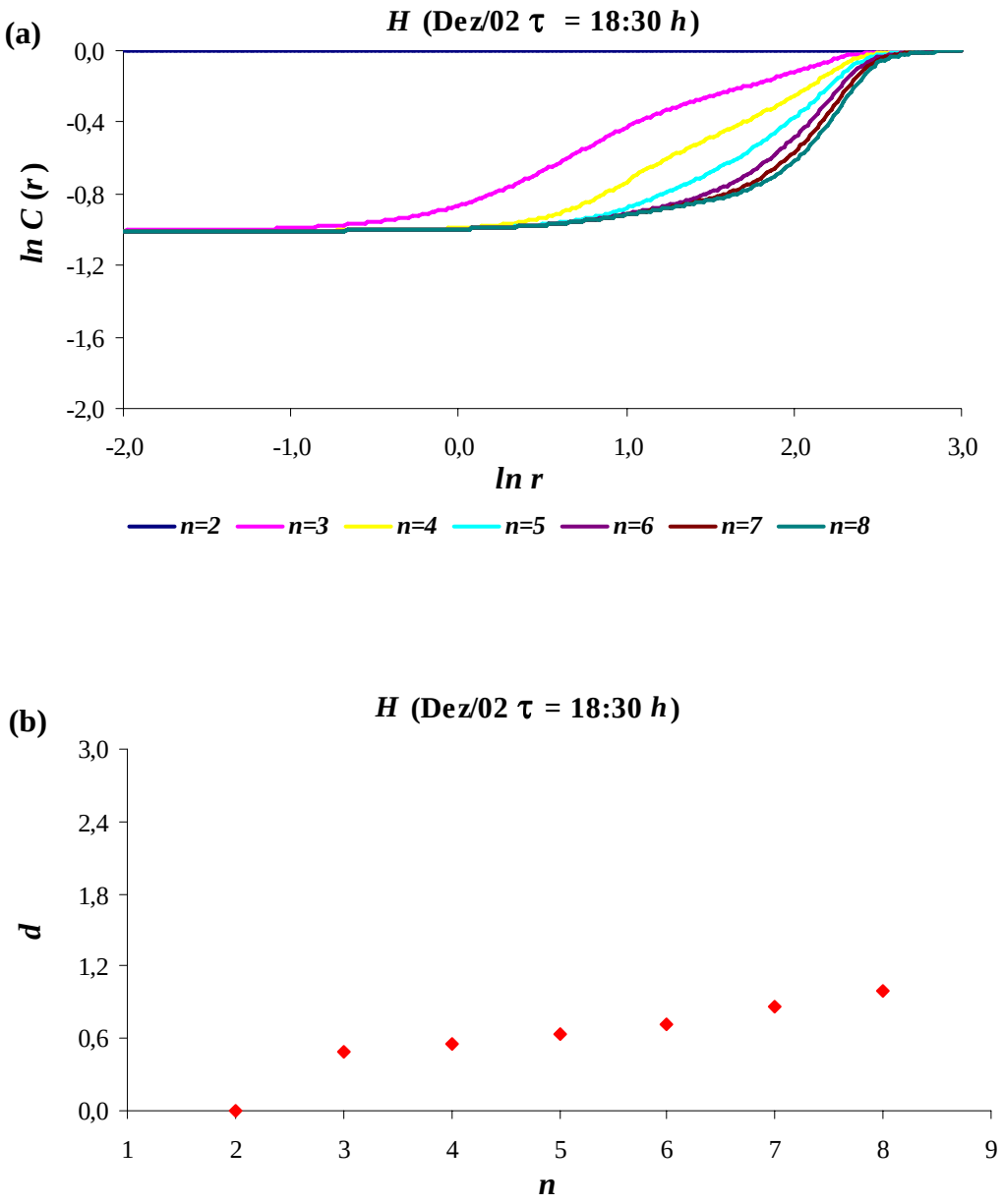


Figura 73. (a) Representação de *ln C*(*r*) *versus ln r* para o Fluxo de Calor Sensível (*H*) para o Período Chuvoso e τ = 18:30 *h*. (b) Dependência da dimensionalidade (*d*) em relação ao número das variáveis do espaço de fase (*n*).

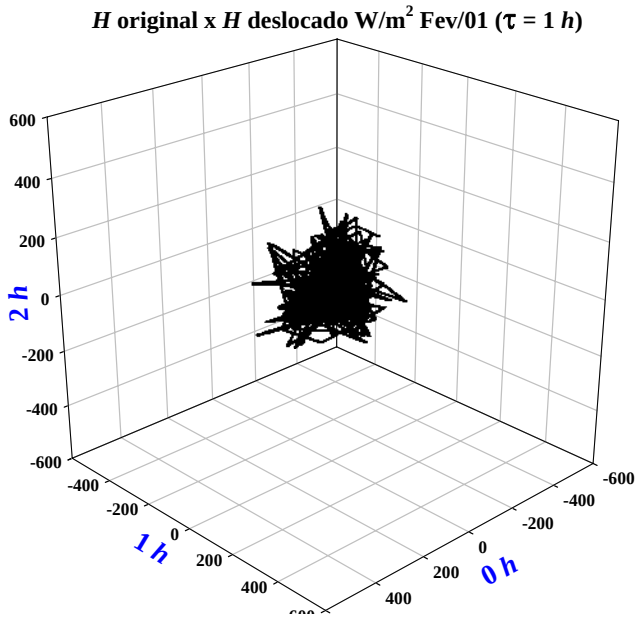


Figura 74. Perfil de fase da evolução temporal do Fluxo de Calor Sensível (*H*) para Fev/01 e τ = 1 *h*.

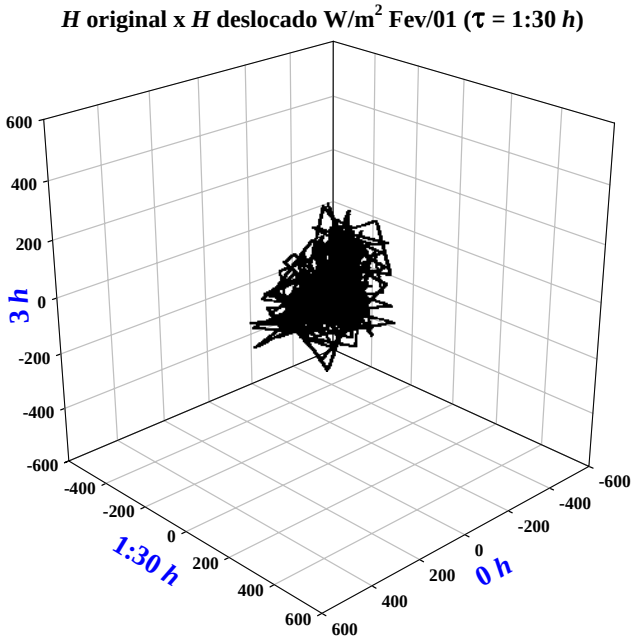


Figura 75. Perfil de fase da evolução temporal do Fluxo de Calor Sensível (*H*) para Fev/01 e τ = 1:30 *h*.

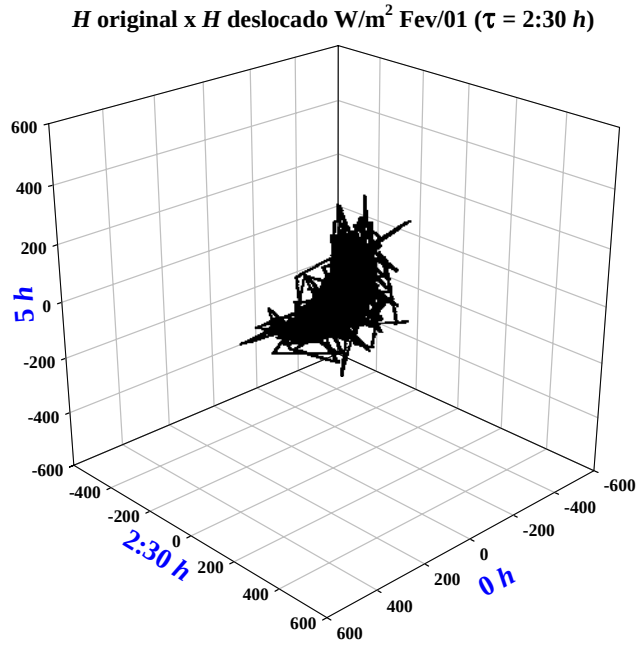


Figura 76. Perfil de fase da evolução temporal do Fluxo de Calor Sensível (*H*) para Fev/01 e τ = 2:30 *h*.

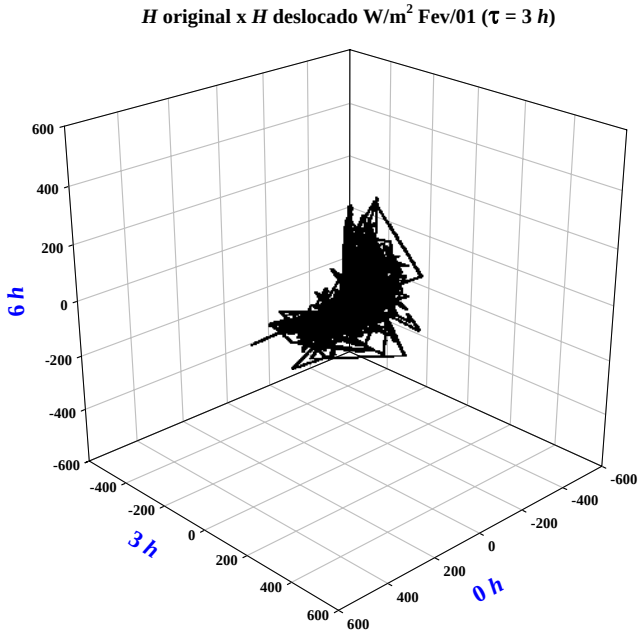


Figura 77. Perfil de fase da evolução temporal do Fluxo de Calor Sensível (*H*) para Fev/01 e τ = 3 *h*.

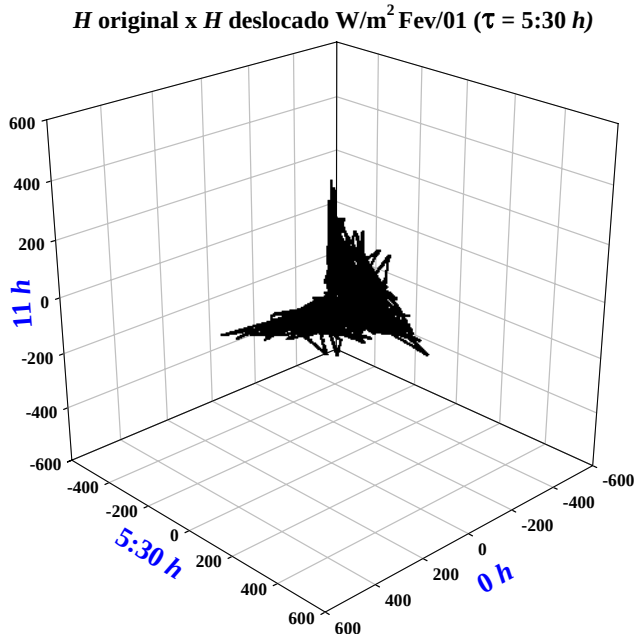


Figura 78. Perfil de fase da evolução temporal do Fluxo de Calor Sensível (*H*) para Fev/01 e τ = 5:30 *h*.

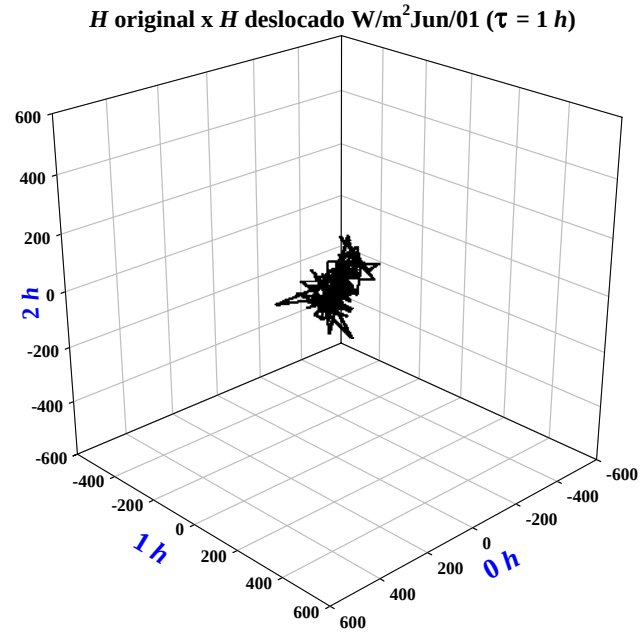


Figura 79. Perfil de fase da evolução temporal do Fluxo de Calor Sensível (*H*) para Jun/01 e τ = 1 *h*.

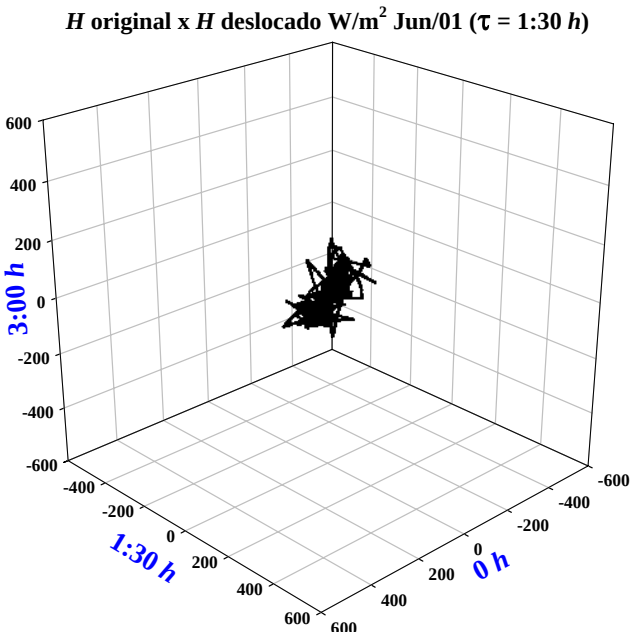


Figura 80. Perfil de fase da evolução temporal do Fluxo de Calor Sensível (*H*) para Jun/01 e τ = 1:30 *h*.

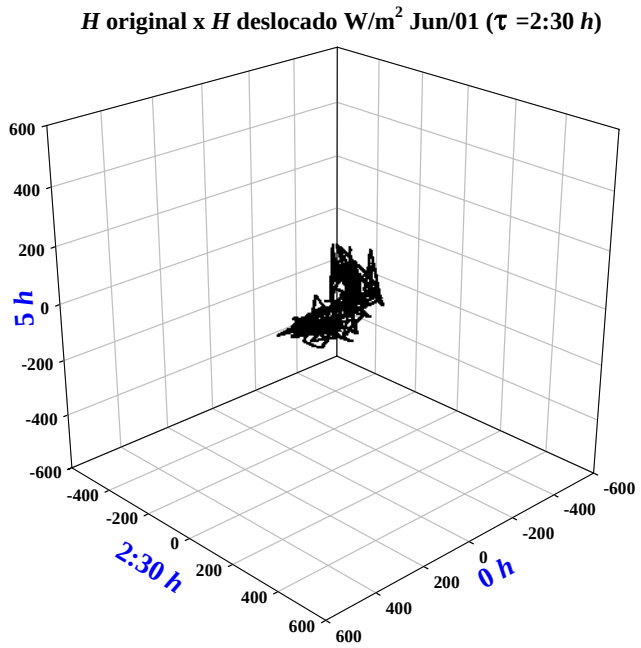


Figura 81. Perfil de fase da evolução temporal do Fluxo de Calor Sensível (*H*) para Jun/01 e τ = 2:30 *h*.

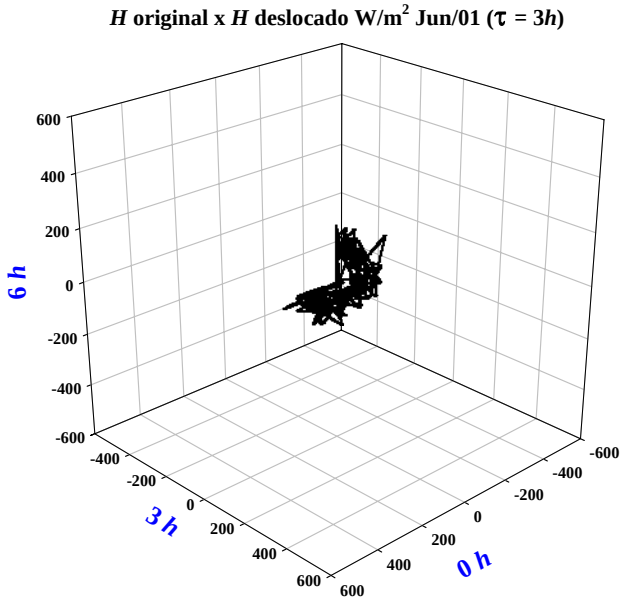


Figura 82. Perfil de fase da evolução temporal do Fluxo de Calor Sensível (*H*) para Jun/01 e τ = 3 *h*.

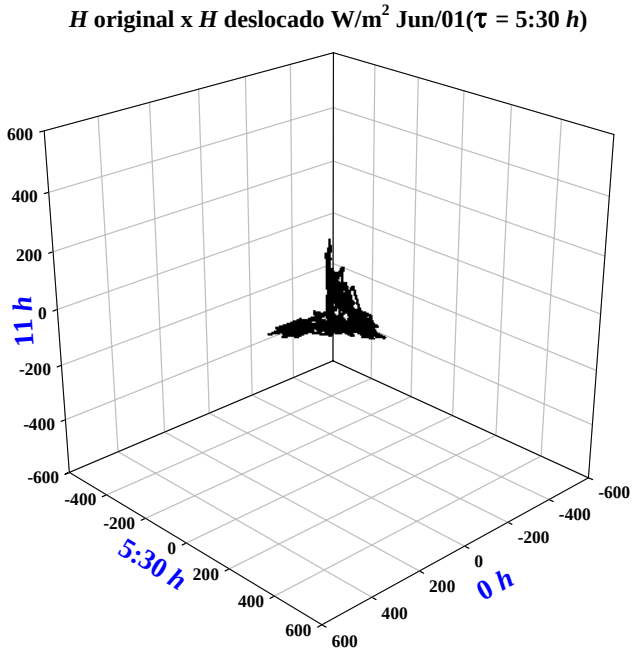


Figura 83. Perfil de fase da evolução temporal do Fluxo de Calor Sensível (*H*) para Jun/01 e τ = 5:30 *h*.

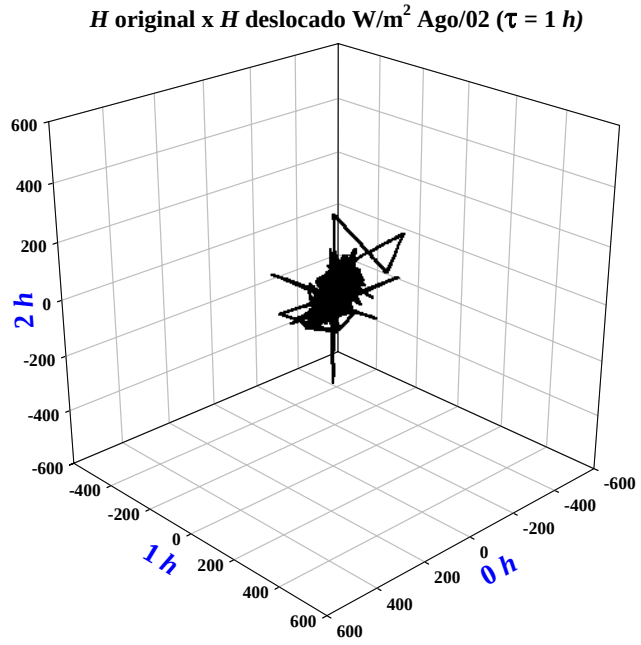


Figura 84. Perfil de fase da evolução temporal do Fluxo de Calor Sensível (*H*) para Ago/02 e τ = 1 *h*.

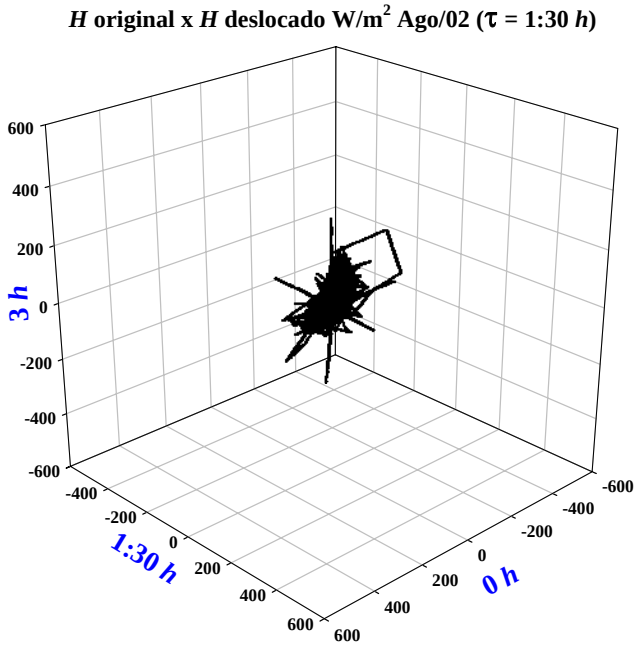


Figura 85. Perfil de fase da evolução temporal do Fluxo de Calor Sensível (*H*) para Ago/02 e τ = 1:30 *h*.

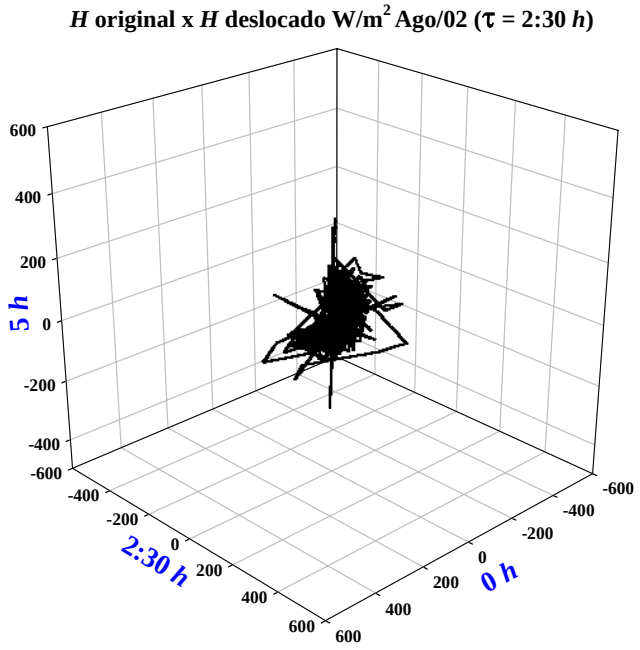


Figura 86. Perfil de fase da evolução temporal do Fluxo de Calor Sensível (*H*) para Ago/02 e τ = 2:30 *h*.

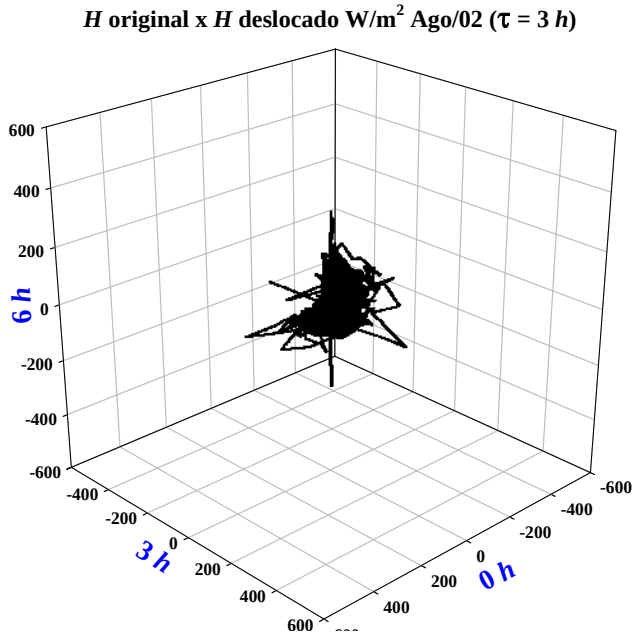


Figura 87. Perfil de fase da evolução temporal do Fluxo de Calor Sensível (*H*) para Ago/02 e τ = 3 *h*.

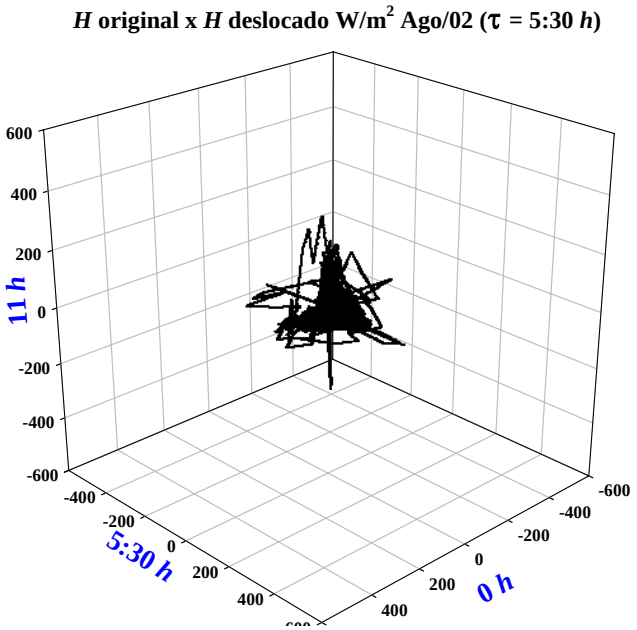


Figura 88. Perfil de fase da evolução temporal do Fluxo de Calor Sensível (*H*) para Ago/02 e τ = 5:30 *h*.

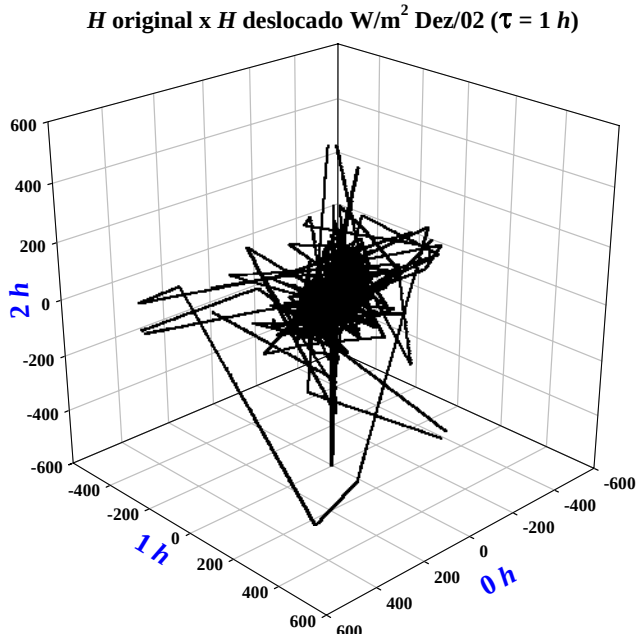


Figura 89. Perfil de fase da evolução temporal do Fluxo de Calor Sensível (*H*) para Dez/02 e τ = 1 *h*.

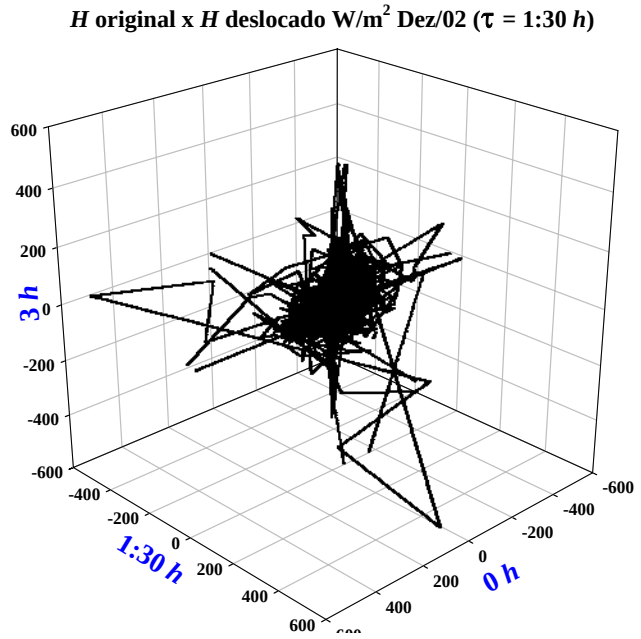


Figura 90. Perfil de fase da evolução temporal do Fluxo de Calor Sensível (*H*) para Dez/02 e τ = 1:30 *h*.

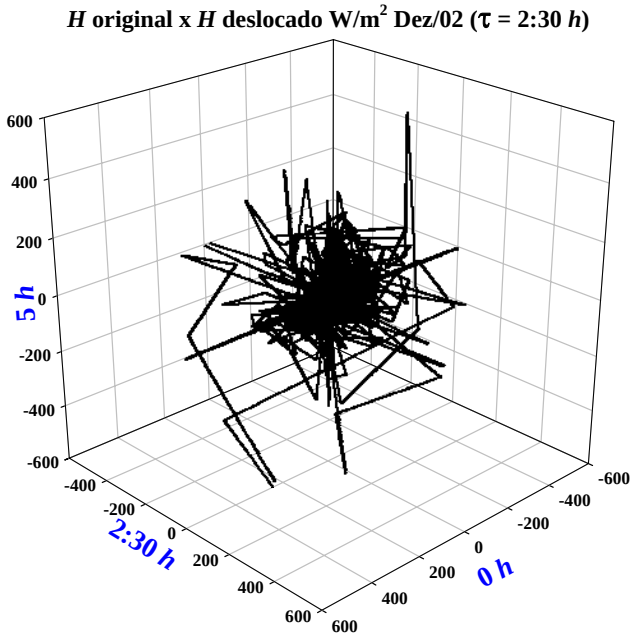


Figura 91. Perfil de fase da evolução temporal do Fluxo de Calor Sensível (*H*) para Dez/02 e τ = 2:30 *h*.

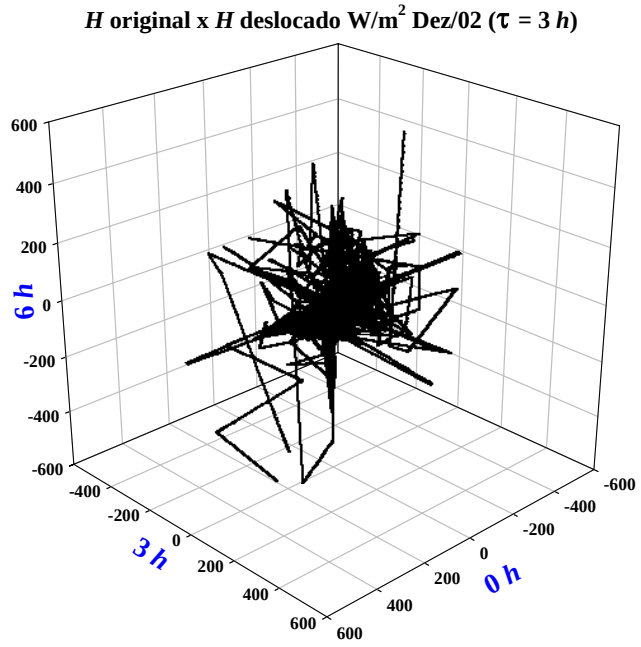


Figura 92. Perfil de fase da evolução temporal do Fluxo de Calor Sensível (*H*) para Dez/02 e τ =3 *h*.

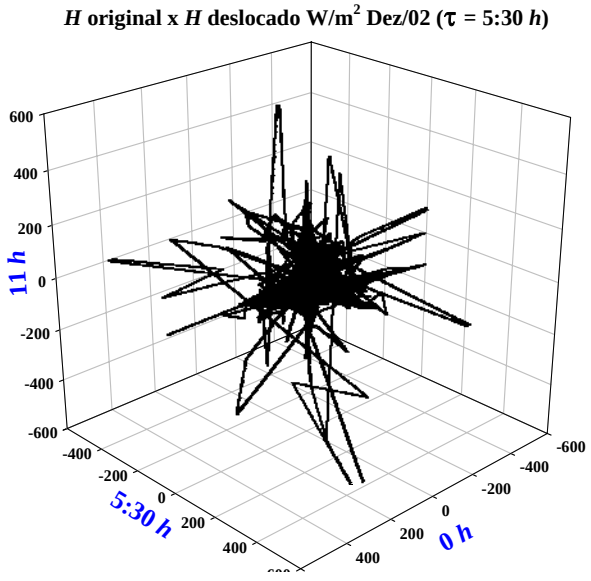


Figura 93. Perfil de fase da evolução temporal do Fluxo de Calor Sensível (*H*) para Dez/02 e τ = 5:30 *h*.

Estas dinâmicas temporais foram reduzidas para um conjunto limite de variáveis chaves, porém, neste estágio e para este estudo, o método utilizado não permitiu a identificação da sua natureza específica.

Os atratores encontrados para os Fluxos de CO_2 (*Fc*), Calor Latente (*LE*) e Calor sensível (*H*), foram fractais (pois suas dimensões não foram números inteiros) e de baixa dimensionalidade. A baixa dimensionalidade dos atratores demonstrou que, para os fluxos e períodos analisados, o ecossistema do qual eles fazem parte, tem conseguido se manter estável. Apenas em alguns períodos, essa dimensionalidade esteve próxima de 3, número este que denota a transição para o regime caótico, ou seja, de baixa estabilidade.

5. CONCLUSÕES

Analisando-se os resultados obtidos para a dimensionalidade do atrator (*d*), para as séries temporais dos dados: Fluxo de CO_2 (*Fc*), Fluxo de Calor Latente (*LE*) e Fluxo de Calor Sensível (*H*), concluiu-se que os atratores obtidos para esses conjuntos de dados foram fractais, pois suas dimensões não foram inteiras e tiveram baixa dimensionalidade, estando entre 0 e 3, tanto para τ = 18:30 *h*, quanto com τ variável.

De acordo com a Teoria da Complexidade (NICOLIS e PRIGOGINE, 1998), os atratores fractais serão estáveis se a sua dimensionalidade for menor que 3. Quanto menor a dimensionalidade, maior a estabilidade. Assim sendo, conforme os resultados deste trabalho pode-se concluir que pelo menos nos períodos não chuvosos, houve uma estabilidade relativamente grande para o ecossistema estudado. O mesmo não se pode afirmar com relação ao Período chuvoso (como, por exemplo, no caso do Fluxo de CO_2 para o mês de Fevereiro de 2001). Isso pareceu indicar que, nessa estação, o ecossistema perdeu estabilidade, havendo aumento significativo na variabilidade das grandezas microclimatológicas. Contudo, uma conclusão definitiva sobre esse aspecto depende da análise de uma maior quantidade de dados.

Concluiu-se, então, que nos modelos que se proponham a descrever o comportamento dos fluxos estudados neste trabalho, pelo menos seis variáveis devam ser incluídas. No caso particular do Fluxo de CO_2 (*Fc*), há que se considerar, em primeiro lugar, que a radiação solar incidente (*Rn*) e a dinâmica de controle estomatal são variáveis de fundamental importância. O fluxo líquido de CO_2 através do estômato é o principal determinante da condutância estomática, que por sua vez relaciona-se com a evapotranspiração (fluxo de calor latente), importante em estudos atmosféricos e hidrológicos (SANTOS e COSTA, 2003). A resistência estomatal, por sua vez, tem duas componentes: a biológica - que depende da quantidade de água no

solo (*Ws*) e da umidade do ar (*U*) - e a aerodinâmica (*Ra*) - que depende essencialmente do regime de ventos (JONES, 1992).

Assim, *Fc* pode depender, em princípio, das seguintes variáveis: *Rn*, *Ws*, *U* e *Ra*. Teoricamente essas seriam variáveis de fundamental importância para *Fc*. Para que as seis variáveis sejam identificadas, há que se investigar que outras duas seriam mais críticas no comportamento de *Fc*. A própria temperatura pode ser uma dessas variáveis já que ela pode ter efeito direto no processo de abertura dos estômatos. Uma outra variável independente que pode ter efeito considerável é a atividade bacteriana no solo (decomposição) que determina qual a contribuição do solo no fluxo de carbono total (VALENTINI, 2004).

Contudo, na ausência de um modelo definitivo para as variáveis microclimatológicas estudadas tal discussão tem, ainda, uma forte componente especulativa.

5.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Uma possibilidade para a continuidade desse trabalho, no que diz respeito à identificação das correlações entre as variáveis, seria a realização de uma análise de Fourier para cada uma delas, verificando as suas freqüências de variação mais importantes. Procedendo dessa forma, poder-se-ia identificar que variáveis teriam freqüências coincidentes, indicando qual é o grau de dependência entre elas, pelo menos em primeira aproximação.

Como este foi um trabalho preliminar e de grande importância, a partir das conclusões e das considerações acima se sugere que:

- Para trabalhos futuros, sejam utilizadas essas variações das séries de dados temporais, para verificar a existência de atratores climáticos para outros locais, como a cidade de Alta Floresta, para comparação dos dados obtidos;

- Sejam incluídos dados de outros anos da cidade de Sinop, para se ter certeza que o Período do ano influencia na quantidade de variáveis *n*, utilizadas para modelar cada variável analisada neste trabalho.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AKINREMI, O. O.; McGINN, S. M. e McLEAN, H. D. J. Effects of soil temperature and moisture on soil respiration in barley and fallow plots. **Can. J. Soil Sci**., Vol. 79, p. 5-13. 1999. In: PARKIN, T. B. e KASPAR, T. C. Temperature controls on diurnal carbon dioxide flux: Implications for estimating soil carbon loss. **Soil.Sci. Soc. Am. J.**, Vol. 67, p. 1763–1772. 2003.

ARRUDA, J. C. **Balanço de energia em uma área de floresta tropical de transição na região de Sinop em Mato Grosso, entre agosto de 1999 a maio de 2003.** 75p. Dissertação (Mestrado em Física e Meio Ambiente) – Instituto de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 2004.

AUBINET, M.; GRELLE, A.; IBROM, A.; RANNIK, Ü.; MONCRIEFF, J.; FOKEN, T.; KOWALSKI, A. S.; MARTIN, P. H.; BERBIGIER, P.; BERNHOFER, CH.; CLEMENT, R.; ELBERS, J.; GRANIER, A.; GRÜNWALD, T.; MORGENSTERN, K.; PILEGAARD, K.; REBMANN, C.; SNIJDERS, W.; VALENTINI, R.; VESALA, T. Estimates of annual net carbon and water exchange of forests: the EUROFLUX methodology. **Advances in Ecological Research**, Vol. 30, p. 115-173. 2000.

BALDOCCHI, D. D., HICKS, B. B. e MEYERS, T. P. Measuring biosphere-atmosphere exchanges of biologically related gases with micrometeorological methods. **Ecology**, Vol. 69(5), p. 1331-1340. 1988.

BALDOCCHI, D. D.; VERMA, S. B. e ROSENBERG, N. J. Mass and energy exchanges of a soybean under various environmental regimes. **Agron. J.**, Vol. 73, p.

706-710. 1981. In: VERMA, S. B. Micrometeorological methods for measuring surface fluxes of mass and energy. **Remote Sensing Reviews**, Vol. 5, p. 99-115. 1990.

BASSANEZI, R. C. e FERREIRA JR., W. C. **Equações Diferenciais com Aplicações.** São Paulo: Harbra, 1988. 572 p.

BISCOE, P. V.; CLARK J. A.; GREGSON, K.; McGOWAN, M.; MONTEITH, J. L.; SCOTT, R. K. Barley and its environment. I. Theory and Practice. **J. Appl. Ecol**., Vol. 12, p. 227-257. 1975. In: VERMA, S. B. Micrometeorological methods for measuring surface fluxes of mass and energy. **Remote Sensing Reviews**, Vol. 5, p. 99-115. 1990.

BOWEN, I. S. The ratio of heat losses by conduction and by evaporation from any water surface**. Phys. Rev. Ser.** Vol. 2, p. 779-787. 1926. In: VILLA NOVA, N. A. **Estudos sobre o Balanço de Energia em cultura de Arroz.** 78 p. Tese (Meteorologia Agrícola) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, São Paulo, 1973.

BROWN K. W. e ROSENBERG, N. J. Energy and CO_2 balance of an irrigated sugar beet field in the Great Plains. **Agron. J.**, Vol. 63, p. 207-312. 1971. In: VERMA, S. B. Micrometeorological methods for measuring surface fluxes of mass and energy. **Remote Sensing Reviews**, Vol. 5, p. 99-115. 1990.

CAMPELO JR., J. H. **Determinação de evapotranspiração pelo método do balanço de energia – Análise de erros instrumentais.** 79 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1978. In: HAYASHI, M. M. S. **Estudo Sobre o Balanço de Energia em Cultura de Crotalária (*Crotalária juncea L.*).** 79 p. Dissertação (Mestrado em Agricultura Tropical) - Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 2001.

CARTER, L. e HULME, M. **Interim Characterizations of Regional Climate and Related Changes up do 2100.** Associates with the Provisional SRES Marker Emissions Scenarios, IPCC Secretariat, c/o WMO, Geneva, Switzerland. In: NOBRE, C. A. Modelos e cenários para a Amazônia: o papel da ciência. Mudanças climáticas globais: possíveis impactos nos ecossistemas do país. **Parcerias Estratégicas**, nº 12. p. 239-258. 2001.

CERRI, C. E. P.; COLEMAN, K.; JENKINSON, D. S.; BERNOUX, M.; VICTORIA, R.; e CERRI, C. C. Modeling soil carbon from Forest and pasture ecosystems of Amazon, Brazil. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, Vol. 67, p. 1879-1887. 2003.

DAVIDSON, E. A.; VERCHOT, L.; CATTANIO, J. H.; ACKERMAN, I. L.; e CARVALHO, J. E. M. Effects of soil water content on soil respiration in forests and cattle pastures of Eastern Amazonia. **Biogeochemistry,** Vol. 48, p. 53-69. 2000. In: PARKIN, T. B. e KASPAR, T. C. Temperature controls on diurnal carbon dioxide flux: Implications for estimating soil carbon loss. **Soil. Sci. Soc. Am. J.**, Vol. 67, p. 1763-1772. 2003.

DENMEAD O. T. Comparative micrometeorology of a wheat field and a forest of *Pinus radiata*. **Agric. Meteorology**, Vol. 6, p. 357-371. 1969. In: VERMA, S. B. Micrometeorological methods for measuring surface fluxes of mass and energy. **Remote Sensing Reviews**, Vol. 5, p. 99-115. 1990.

FRITSCHEN, L. J. e SIMPSON, J. R. Surface energy and radiation balance systems: General description and improvements. **J. Appl. Meteorol**., Vol. 28, p. 680-689.1989. In: VERMA, S. B. Micrometeorological methods for measuring surface fluxes of mass and energy. **Remote Sensing Reviews**, Vol. 5, p. 99-115. 1990.

GIARDINA, C. P. e RYAN, M. G. Evidence that decomposition rates of organic carbon in mineral soil do not vary with temperature. **Nature**, Vol. 404, p. 858-861. 2000.

GLEICK, J. **Caos**. A criação de uma nova Ciência. 4ª ed. Rio de Janeiro: Campus, 1991. 310p.

GRACE, J. e MALHI, Y. Carbon dioxide goes with the flow. **Nature**, Vol. 416, p. 594-595. 2002.

HARTMAN, R. K. e GAY, L. W**. Improvements in the design and the calibration of temperature measurement systems.** Proceedings of the *15th Conference of Agricultural and Forest Meteorology*. 210p. 1981. In: VERMA, S. B. Micrometeorological methods for measuring surface fluxes of mass and energy. **Remote Sensing Reviews**, Vol. 5, p. 99-115. 1990.

HAYASHI, M. M. S. **Estudo Sobre o Balanço de Energia em Cultura de Crotalária (*Crotalária juncea L.*).** 79 p. Dissertação (Mestrado em Agricultura Tropical) - Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 2001.

HICKS, B. B.; WESELY, M. L.; COULTER, R. L.; HART, R. L.; DURHAM, J. L.; SPEER, R. e STEDMAN, D. H. An experimental study of sulfur and NO_x fluxes over grassland. **Boundary-Layer Meteorol.** Vol. 34, p. 103-121. 1986. In: VERMA, S. B. Micrometeorological methods for measuring surface fluxes of mass and energy. **Remote Sensing Reviews**, Vol. 5, p. 99-115. 1990.

IBGE, 2000. Disponível em:<**http://www.ibge.gov.br/ibgeteen/mapas/home.html**> Acesso em 14 nov. 2004.

JOOS, F.; PRENTICE, I. C.; SITEH, S.; MEYER, R.; HOOS, G.; PLATTNER, G. K.; GERBER, S.;HASSELMANN, K. Global warming feedbacks on terrestrial carbon uptake under the Intergovernmental Panel On Climate Change (IPCC) emission scenarios. **Global Biogeochemical Cycles.** Vol.15, n° 4, p. 891-907. 2001.

IPCC, 2000. **Emissions Scenários – IPCC Special Report.** IPCC Secretariat, c/o WMO, Geneva, Switzerland. In: NOBRE, C. A. Modelos e cenários para a Amazônia: o papel da ciência. Mudanças climáticas globais: possíveis impactos nos ecossistemas do país. **Parcerias Estratégicas**, nº 12. p. 239-258. 2001.

JENSEN, L. S.; MUELLER, T.; TATE, K. R.; ROSS, D. J.; MAGID, J.; NIELSEN, N. E. Soil surface CO_2 flux as an index of soil respiration *in situ*: A comparison of two chamber methods. **Soil Biol. Biochem.**, Vol. 28, p. 1297-1306. 1996. In: PARKIN, T. B. e KASPAR, T. C. Temperature controls on diurnal carbon dioxide flux: Implications for estimating soil carbon loss. **Soil. Sci. Soc. Am. J.**, Vol. 67, p. 1763-1772. 2003.

KAIMAL, J. C. Sensors and techniques for direct measuring of turbulent fluxes and profiles in the atmospheric surface layer. **Atmospheric technology**, Vol. 7, p. 7-14. 1975. In: VERMA, S. B. Micrometeorological methods for measuring surface Fluxes of mass and energy. **Remote Sensing Reviews**, Vol. 5, p. 99-115. 1990.

KANEMASU, E. T., WESELY, M. L., HICKS, B. B. e HEILMAN, J. L. **Techniques for calculating energy and mass fluxes.** p. 156-182.1979. In: VERMA, S. B. Micrometeorological methods for measuring surface fluxes of mass and energy. **Remote Sensing Reviews**, Vol. 5, p. 99-115. 1990.

JONES, H. G. **Plants and Microclimate**. A quantitative approach to environmental plant physiology. 2ª ed. New York: Cambridge University Press, 1992. 413p.

LLOYD, J. e TAYLOR, J. A. On the temperature dependence of soil respiration. **Functional Ecology**, Vol. 8, p. 315-323. 1994.

MIRANDA, E. J.; PRIANTE FILHO, N.; PRIANTE, P. C.; CAMPELO JÚNIOR, J. H.; SULI, G. S.; FRITZEN, C. L.; NOGUEIRA, J. de S.; VOURLITIS, G. L. Maximum leaf photosynthetic light response for three species in a transitional

tropical Forest in Southern Amazonia. **Revista Bras. de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Vol. 8, nº 1, p. 164-167. 2004.

MUNHOVEN, G. Glacial-interglacial changes of continental weathering: estimates of the related CO_2 and HCO_3^- flux variations and their uncertainties. **Global and Planetary Change**, Vol. 33, p. 155-176. 2002.

NICOLIS, G. e PRIGOGINE, I. **Exploring Complexity** – An Introduction. 5ª edição. New York, U.S.A.: W. H. Freeman and Company, 1998. 312p.

NOBRE, C. A. Modelos e cenários para a Amazônia: o papel da ciência. Mudanças climáticas globais: possíveis impactos nos ecossistemas do país. **Parcerias Estratégicas**, nº 12. p. 239-258. 2001.

OMETTO, J. C. **Bioclimatologia Vegetal**. 1ª ed. São Paulo: Editora Agronômica Ceres Ltda., 1981. 440p.

PARKIN, T. B. e KASPAR, T. C. Temperature controls on diurnal carbon dioxide flux: Implications for estimating soil carbon loss. **Soil.Sci. Soc. Am. J**., Vol. 67, p. 1763-1772. 2003.

PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. **Agrometeorologia.** Fundamentos e Aplicações Práticas. 1ª ed. Guaíba-RS: Livraria e Editora Agropecuária, 2002. 478p.

PEREIRA, A. R.; VILLA NOVA, N. A.; SEDYIAMA, G. C. **Evapo(transpi)ração.** São Paulo: Fundação de Estudos Agrários Luiz de Queiroz (FEALQ), 1997. 183p.

PRIANTE FILHO, N.; HAYASHI, M. M. S., NOGUEIRA, J. S. de; CAMPELO JR, J. H., NUNES, P. C.; SANCHES, L.; COUTO, E. G.; HOEGER, W.; RAITER, F.; TRIENWEILER, J. L.; MIRANDA, E. J.; PRIANTE, P. C.; PEREIRA, L. C.; BIUDES, M. S.; FRITZEN, C. L.; LACERDA, M.; SULI, G. S.; SHIRAIWA, S.;

SILVEIRA, M.; VOURLITIS, G. L. Comparison of the mass and energy Exchange of a pasture and a mature transitional tropical forest of the southern Amazon basin during the wet-dry season transition. **Global Change Biology**, Urbana – IL – USA**,** Vol. 10, p. 863-876. 2004.

RAICH, J. W. e POTTER, C. S. Global patterns of carbon dioxide emissions from soils. **Global Biogeochemical Cycles**, Vol. 9, nº 1, p. 23-36. 1995.

RICHEY, J. E.; MELACK, J. M.; AUFDENKAMPE, A. K.; BALLESTER, V. M. e HESS, L. L. Outgassing from Amazonian rivers and wetlands as a large tropical source of atmospheric CO_2. **Nature**, Vol. 416, p. 617-619. 2002.

ROCHA, H. R.; SELLERS P. J.; COLLATZ G. J.; WRIGHT I. R.; GRACE J. **Calibration and use of the SiB2 model to estimate water vapour and carbon exchange at the ABRACOS forest sites.** Amazonian Deforestation and Climate. 1ª ed. Inglaterra: JOHN WILEY & SONS LTD, 1996. 611p.

RUELLE, D. **Acaso e Caos**. 1ª ed. São Paulo: UNESP, 1993. 224p.

SALESKA, S. R.; MILLER, S. D.; MATROSS, D. M.; GOULDEN, M. L.; WOFSY, S. C.; ROCHA, H. R. da; CAMARGO, P. B. de; CRILL, P.; DAUBE, B. C.; FREITAS, H. C. de; HUTYRA, L.; KELLER, M.; KIRCHHOFF, V.; MENTON, M.; MUNGER, J. W.; PYLE, E. H.; RICE, A. H.; SILVA, H. Carbon in Amazon Forests: Unexpected seasonal fluxes and disturbance-induced losses. **Science**, Vol. 302, p. 1554-1557. 2003.

SANTOS, S. N. M. e COSTA, M. H. Simulações de fluxo de carbono em um ecossistema de floresta tropical. **Revista Brasileira de Meteorologia**, Vol. 18, n°1, p. 87-96. 2003.

TANNER, C. B. Energy Balance approach to evpotranspiration from crops. **Soil Sci. Soc. Amer. Proc.**, Vol. 24, p. 1-9. 1960. In: VERMA, S. B. Micrometeorological

methods for measuring surface fluxes of mass and energy. **Remote Sensing Reviews**, Vol. 5, p. 99-115. 1990.

TANNER, C. B. Evaporation of water from plants and soils. Water deficits and plant growth. **Academic Press**. Vol. 1, p. 73-106. 1968. In: PEREIRA, A. R.; VILLA NOVA, N. A.; SEDYIAMA, G. C. **Evapo(transpi)ração.** São Paulo: Fundação de Estudos Agrários Luiz de Queiroz (FEALQ), 183p. 1997.

VALENTINI, C. M. A. **Efluxo de *CO*$_2$ do solo de uma área de floresta de transição no noroeste de Mato Grosso.** 81p. Dissertação (Mestrado em Física e Meio Ambiente) – Instituto de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal de Mato Grosso. Cuiabá, 2004.

VALENTINI, R.; MATTEUCCI, G.; DOLMAN, A. J.; SCHULZE, E. D.; REBMANN, C.; MOORS, E. J.; GRANIER, A.; GROSS, P.; JENSEN, N. O.; PILEGAARD, K.; LINDROTH, A.; GRELLE, A.; BERNHOFER, C.; GRÜNWALD, T.; AUBINET, M.; CEULEMANS, R.; KOWALSKI, A. S.; VESALA, T.; RANNIK, Ü.; BERBIGIER, P.; LOUSTAU, D.; GUðMUNDSSON, J.; THORGEIRSSON, H.; IBROM, A.; MORGENSTERN, K.; CLEMENT, R.; MONCRIEFF, J.; MONTAGNANI, L.; MINERBI, S.; JARVIS, P. G. Respiration as the main determinant of carbon balance in European forests. **Nature**, Vol. 404, p. 861-865. 2000.

VERMA, S. B. Micrometeorological methods for measuring surface fluxes of mass and energy. **Remote Sensing Reviews**, Vol. 5, p. 99-115. 1990.

VERMA, S. B.; KIM, J. e CLEMENT, R. J. Carbon dioxide, water vapor and sensible hat fluxes over a tallgrass prairie. **Boundary-Layer Meteorol**. Vol. 46, p. 53-67. 1989. In: VERMA, S. B. Micrometeorological methods for measuring Surface fluxes of mass and energy. **Remote Sensing Reviews**, Vol. 5, p. 99-115. 1990.

VERMA, S. B. e ROSENBERG, N. J. Accuracy of lysimetric, energy balance and stability-corrected aerodynamic methods of estimating above-canopy flux of CO_2. **Agron. J.**, Vol. 67, p. 699-704. 1975. In: VERMA, S. B. Micrometeorological methods for measuring surface fluxes of mass and energy. **Remote Sensing Reviews**, Vol. 5, p. 99-115. 1990.

VERMA, S. B.; BALDOCCHI, D. D.; ANDERSON, D. E.; MATT, D. R.; CLEMENT, R. J. Eddy fluxes of CO_2, water vapor, and sensible heat over a deciduous forest. **Boundary-Layer Meteorol.**, Vol. 36, p. 71-91. 1986. In: VERMA, S. B. Micrometeorological methods for measuring surface fluxes of mass and energy. **Remote Sensing Reviews**, Vol. 5, p. 99-115. 1990.

VILLA NOVA, N. A. **Estudos sobre o Balanço de Energia em cultura de Arroz.** 78p. Tese (Meteorologia Agrícola) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, São Paulo, 1973.

VOURLITIS, G. L.; PRIANTE FILHO, N.; HAYASHI, M. M.; NOGUEIRA, J. S. de; CASEIRO, F.; CAMPELO JR., J. H. Seasonal variations in net ecosystem CO_2 exchange of a mature Amazonian transitional tropical Forest (cerradão). **Functional Ecology.** V.15, p. 388-395. 2001.

VOURLITIS, G. L.; PRIANTE FILHO, N.; HAYASHI, M. M.; NOGUEIRA, J. S. de; CASEIRO, F.; CAMPELO JR., J. H. Seasonal variations in evapotranspiration of a transitional tropical Forest of Mato Grosso, Brazil. **Water Resources Research**, Vol. 38, nº 6, p. 30-1 - 30-11. 2002.

WESELY, M. L.; EASTMAN, J. A.; COOK, D. R. e HICKS, B. B. Daytime variations of ozone eddy fluxes to maize. **Boundary-Layer Meteorol.** Vol.15, p. 361-373. 1978. In: VERMA, S. B. Micrometeorological methods for measuring surface fluxes of mass and energy. **Remote Sensing Reviews**, Vol. 5, p. 99-115. 1990.