

**PATRICK SIQUEIRA DA ROCHA**

**TEORIA DE SISTEMAS CINZAS APLICADA AO  
ESTUDO DE VARIÁVEIS MICROMETEOROLÓGICAS  
EM UMA REGIÃO DE CERRADO NO ESTADO DE  
MATO GROSSO**

Cuiabá, MT

Julho de 2013

UNIVERSIDADE FEDERAL DO MATO GROSSO – UFMT  
INSTITUTO DE FÍSICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA AMBIENTAL

**TEORIA DE SISTEMAS CINZAS APLICADA AO ESTUDO DE  
VARIÁVEIS MICROMETEOROLÓGICAS EM UMA REGIÃO  
DE CERRADO NO ESTADO DE MATO GROSSO**

**PATRICK SIQUEIRA DA ROCHA**

Orientador: Prof. Dr. José de Souza Nogueira  
Coorientador: Prof. Dr. Sérgio Roberto de Paulo

Cuiabá, MT  
Julho de 2013

UNIVERSIDADE FEDERAL DO MATO GROSSO – UFMT  
INSTITUTO DE FÍSICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA AMBIENTAL

**TEORIA DE SISTEMAS CINZAS APLICADA AO ESTUDO DE  
VARIÁVEIS MICROMETEOROLÓGICAS EM UMA REGIÃO  
DE CERRADO NO ESTADO DE MATO GROSSO**

**PATRICK SIQUEIRA DA ROCHA**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental da Universidade Federal de Mato Grosso, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Física Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. José de Souza Nogueira  
Coorientador: Prof. Dr. Sérgio Roberto de Paulo

Cuiabá, MT  
Julho de 2013

### **Dados Internacionais de Catalogação na Fonte.**

S618t Siqueira da Rocha, Patrick.  
TEORIA DE SISTEMAS CINZAS APLICADA AO ESTUDO DE VARIÁVEIS  
MICROMETEOROLÓGICAS EM UMA REGIÃO DE CERRADO NO ESTADO  
DE MATO GROSSO / Patrick Siqueira da Rocha. -- 2013  
vi, 64 f. : il. color. ; 30 cm.

Orientador: José de Souza Nogueira.  
Co-orientador: Sérgio Roberto de Paulo.  
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Mato Grosso, Instituto de Física,  
Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental, Cuiabá, 2013.  
Inclui bibliografia.

1. Grau de Incidência Cinza. 2. Preenchimento de Falhas. 3. Modelo Cinza  
GM(1,1). I. Título.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

**Permitida a reprodução parcial ou total, desde que citada a fonte.**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO**  
**INSTITUTO DE FÍSICA**  
**Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental**

**FOLHA DE APROVAÇÃO**

**TÍTULO: TEORIA DE SISTEMAS CINZAS APLICADA AO ESTUDO DE  
VARIÁVEIS MICROMETEOROLÓGICAS EM REGIÃO DE  
CERRADO NO ESTADO DE MATO GROSSO**

**AUTOR: PATRICK SIQUEIRA DA ROCHA**

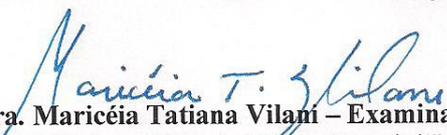
Tese de Doutorado defendida e aprovada em 04 de julho de 2013, pela comissão julgadora:

  
**Prof. Dr. José de Souza Nogueira**  
**Orientador**  
Instituto de Física - UFMT

  
**Profa. Dra. Luciana Sanches**  
**Examinadora Interna**  
Faculdade de Arquitetura, Engenharia e Tecnologia  
UFMT

  
**Prof. Dr. Elvis Lira da Silva**  
**Examinador Externo**  
Instituto de Física/UFMT

  
**Prof. Dr. Adilson Pasheco de Souza**  
**Examinador Externo**  
Instituto de Ciências Agrárias e Ambientais/Sinop/UFMT

  
**Profa. Dra. Maricéia Tatiana Vilani – Examinadora Externa**  
Centro Universitário de Várzea Grande/UNIVAG

*Dedico este trabalho aqueles que ainda sonham.*

## AGRADECIMENTOS

- Agradeço aos meus pais, Ivo e Zeli, e a minha irmã Daniele. O convívio com estas pessoas me tornou o que sou hoje. Se pude desenvolver habilidades e competências, devo ao seio familiar estas dádivas.
- Agradeço a Minha esposa Sandra Maria, que compõem minha outra metade. Sem ela eu não seria completo e logo não poderia tentar fazer ciência.
- Agradeço imensamente ao Prof. Dr. José de Souza Nogueira (Paraná). Primeiramente por tornar possível, por meio de sua eficiente condução do Programa de Pós Graduação em Física Ambiental, a realização de inúmeros sonhos daqueles que sonharam fazer um doutorado. Segundo, agradeço pela prontidão com que me acolheu desde o início de minha jornada neste programa, respeitando meu tempo e meu processo de adaptação à nova casa. E por último, agradeço pelo empenho desprendido em minha orientação nesta etapa final de trabalho, que me possibilitou concluir esta jornada.
- Agradeço ao casal de cientistas, Prof. Dr. Sérgio Roberto de Paulo e Profa. Dra. Iramaia Jorge Cabral de Paulo, que muito trabalharam para que eu pudesse ingressar neste programa de doutorado. Agradeço a vocês dois pelo carinho, amizade, companheirismo e dedicação que tornaram possível minha volta a vida acadêmica. Agradeço aos dois por todo o conhecimento compartilhado, seja durante as disciplinas, seja durante nossas conversas. Agradeço ainda pela minha orientação durante quase todo o tempo em que estive aqui.
- Agradeço aos amigos Miguel Jorge Neto e Paulo Henrique Zanella de Arruda por tanto me ajudarem durante todo este tempo. A contribuição de vocês foi fundamental para que chegasse até aqui.
- Agradeço a todos os professores do Programa de Pós Graduação em Física Ambiental por tudo que compartilharam durante esta minha estada.
- Agradeço a Profa. Dra. Marta Cristina de Jesus Albuquerque Nogueira, exemplo para mim do que é seriedade e compromisso com as responsabilidades que nos competem. Agradeço também por todo o suporte à mim direcionado nestes tempos e pelo carinho com que sempre me tratou, além claro, de toda a sua contribuição para que este trabalho seguisse regras e normas, tornando-o um material melhor.

- Agradeço a todos os companheiros de jornada na Física Ambiental por me receberem tão bem e por compartilharem comigo aquilo que vocês traziam de um período passado dentro desta instituição de pesquisa.
- Agradeço ainda as valorosas contribuições propostas pelos professores: Adilson Pacheco de Souza, Elvis Lira da Silva, Luciana Sanches e Maricéia Tatiane Vilani.
- Agradeço à CAPES pelo suporte financeiro.
- Por fim, gostaria de agradecer a todo brasileiro pagador de impostos pois, sem eles, nada disto seria possível.

*Yesterday, upon the stair,  
I met a man who wasn't there  
He wasn't there again today  
I wish, I wish he'd go away...*

*When I came home last night at three  
The man was waiting there for me  
But when I looked around the hall  
I couldn't see him there at all!*

*Go away, go away, don't you come back any more!  
Go away, go away, and please don't slam the door... (slam!)*

*Last night I saw upon the stair  
A little man who wasn't there  
He wasn't there again today  
Oh, how I wish he'd go away*

*-Hughes Mearns*

## SUMÁRIO

LISTA DE ILUSTRAÇÕES	I
LISTA DE TABELAS	II
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS	IV
RESUMO	V
ABSTRACT	VI
<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
1.1 PROBLEMÁTICA . . . . .	1
1.2 JUSTIFICATIVA . . . . .	2
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>4</b>
2.1 TEORIA DE SISTEMAS CINZAS . . . . .	4
2.1.1 INTRODUÇÃO . . . . .	4
2.1.2 ÁLGEBRA DE SISTEMAS CINZAS . . . . .	6
2.1.3 <i>KERNEL</i> E GRAU DE ACINZENTAMENTO DE UM NÚMERO CINZA . . . . .	7
2.1.4 SÉRIE TEMPORAL E PREENCHIMENTO DE FALHAS . . . . .	9
2.1.5 ANÁLISE DE INCIDÊNCIA CINZA . . . . .	9
2.1.5.1 <i>Operadores de Sequências Cinzas</i> . . . . .	10
2.1.5.2 <i>Análise Relacional Cinza</i> . . . . .	10
2.1.5.3 <i>Grau de Similaridade e Proximidade de Incidência Cinza</i>	12
2.1.6 MODELOS CINZAS DE PREVISÃO . . . . .	15
2.1.6.1 <i>O Modelo Cinza Clássico - GM(1,1)</i> . . . . .	15

<b>2.2</b>	<b>RADIAÇÃO</b>	<b>18</b>
2.2.1	BALANÇO DE RADIAÇÃO	18
2.2.1.1	<i>Balanço de Ondas Curtas</i>	19
2.2.1.2	<i>Balanço de Ondas Longas</i>	19
<b>3</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b>	<b>21</b>
3.1	LOCAL DE ESTUDO	21
3.2	INSTRUMENTAÇÃO MICROMETEOROLÓGICA	23
3.3	PRÉ-PROCESSAMENTO E ANÁLISE DOS DADOS	25
3.3.1	FERRAMENTA COMPUTACIONAL	25
3.3.2	ENTRADA DOS DADOS	26
3.3.3	PRÉ PROCESSAMENTO	27
3.3.3.1	<i>Investigação e Preenchimento de Falhas</i>	27
3.3.3.2	<i>Processos de Inicialização das Séries</i>	28
3.3.3.3	<i>Cálculo do Grau de Incidência Cinza</i>	29
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>31</b>
4.1	PREENCHIMENTO DE FALHAS	31
4.2	ANÁLISE DE INCIDÊNCIA	32
4.2.1	APRESENTAÇÃO DAS MATRIZES DE COEFICIENTES DE INCIDÊNCIA	33
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	<b>45</b>
5.1	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	46
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>47</b>
	<b>APÊNDICE A CÓDIGOS ESCRITOS EM MATLAB</b>	<b>53</b>
A.0.1	FUNÇÃO INVESTIGA.M	53
A.0.2	FUNÇÃO MEDIAGLOBAL.M	55

<b>A.0.3</b>	<b>FUNÇÃO GM11.M</b>	<b>56</b>
<b>A.0.4</b>	<b>FUNÇÃO EQUALIZAR.M</b>	<b>58</b>
<b>A.0.5</b>	<b>FUNÇÃO IMAGEMZERO.M</b>	<b>59</b>
<b>A.0.6</b>	<b>FUNÇÃO IMAGEMUM.M</b>	<b>60</b>
<b>A.0.7</b>	<b>FUNÇÃO GICA.M</b>	<b>61</b>
<b>A.0.8</b>	<b>FUNÇÃO GICR.M</b>	<b>62</b>
<b>A.0.9</b>	<b>FUNÇÃO GICPE.M</b>	<b>63</b>
<b>A.0.10</b>	<b>FUNÇÃO GICSG.M</b>	<b>64</b>

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	Representação pictórica dos sistemas. . . . .	4
Figura 2	Diagrama de Venn para ciências interdisciplinares. . . . .	5
Figura 3	Comparação entre série temporal original e submetida a OGA. . . . .	16
Figura 4	Localização da torre micrometeorológica (Fonte: Wagner Rodrigues). . . . .	21
Figura 5	Fotos da região de instalação da torre micrometeorológica (fonte: Paulo Henrique Zanella de Arruda). . . . .	22
Figura 6	Detalhes da torre micrometeorológica de coleta de dados (fonte: Flair José de Carrilho Sobrinho). . . . .	23
Figura 7	Instrumentos instalados na torre micrometeorológica . . . . .	24
Figura 8	Layout do processo de cálculo da análise de incidência cinza. . . . .	25
Figura 9	Representação esquemática do processo de janelamento . . . . .	28
Figura 10	Comparação entre a série original e suas imagens inicializadas. . . . .	29
Figura 11	Resultado do preenchimento de falhas. . . . .	32
Figura 12	Comparação entre a temperatura do ar e a temperatura do solo em diversas profundidades. . . . .	39
Figura 13	Comparação entre a temperatura do solo as profundidades de 1 cm e 20 cm e a umidade do solo para o mês de seca (A) e de chuva (B). . . . .	41
Figura 14	Espaço de fase construído utilizando o saldo de radiação (t) e temperatura do ar a 5m (t) (a) e saldo de radiação (t) e temperatura do solo a 1cm (t) (b). O período temporal total corresponde a 31 dias do mês de agosto de 2012 e o intervalo entre duas observações sucessivas é de 30 minutos. . . . .	43
Figura 15	Espaço de fase construído utilizando o saldo de radiação (t) e temperatura do ar a 5m (t) (a) e saldo de radiação (t) e temperatura do solo a 1cm (t) (b). O período temporal total corresponde a 31 dias do mês de dezembro de 2012 e o intervalo entre duas observações sucessivas é de 30 minutos. . . . .	44

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Comparativo entre sistemas, sob diferentes perspectivas. . . . .	5
Tabela 2	Precipitação acumulada no ano de 2012. . . . .	26
Tabela 3	Legenda das variáveis micrometeorológicas usadas nos cálculos. . . . .	33
Tabela 4	Matriz de incidência cinza por semelhança geométrica - agosto 2012a . . .	34
Tabela 5	Matriz de incidência cinza por semelhança geométrica - agosto 2012b . . .	34
Tabela 6	Matriz de incidência cinza sintética - agosto 2012a . . . . .	35
Tabela 7	Matriz de incidência cinza sintética - agosto 2012b . . . . .	35
Tabela 8	Matriz de incidência cinza por semelhança geométrica - dezembro 2012a . .	36
Tabela 9	Matriz de incidência cinza por semelhança geométrica - dezembro 2012b . .	36
Tabela 10	Matriz de incidência cinza sintética - dezembro 2012a . . . . .	37
Tabela 11	Matriz de incidência cinza sintética - dezembro 2012b . . . . .	37

## LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

$\alpha$	albedo .....	19
$\hat{\otimes}$	<i>Kernel</i> de um número cinza .....	7
$\hat{\otimes}_{(g^\circ)}$	forma simplificada de um número cinza .....	8
$\lambda$	comprimento de onda .....	18
max{}	Valor máximo de uma variável ou conjunto de variáveis .....	7
min{}	Valor mínimo de uma variável ou conjunto de variáveis .....	7
$\nu$	frequência .....	18
$\otimes$	Número cinza .....	6
$\emptyset(k)$	falha na posição $k$ .....	9
$c$	velocidade da luz no vácuo .....	18
$G$	fluxo de calor no solo .....	24
$g^\circ(\otimes)$	grau de acinzentamento de um número cinza $\otimes$ .....	8
$GM(1, 1)$	modelo cinza de primeira ordem e uma variável .....	15
$ppt$	precipitação .....	23
$R_c$	radiação difusa ou radiação de céu .....	19
$R_d$	radiação direta .....	19
$R_g$	radiação global .....	19
$Rn$	saldo de radiação .....	23
$T_{ar}$	temperatura do ar .....	23
$T_{solo}$	temperatura do solo .....	24
$UR_{ar}$	umidade relativa do ar .....	23

$UR_{solo}$	umidade do solo .....	24
$X_i$	série temporal com $n$ entradas .....	9
AIC	Análise de Incidência Cinza .....	9
ARC	Análise Relacional Cinza .....	10
BOC	balanço de ondas curtas .....	19
BOL	balanço de ondas longas .....	19
EEM	erro estimado percentual mínimo .....	27
gica	grau de incidência cinza absoluto .....	13
gicp	grau de incidência cinza de proximidade .....	13
gicr	grau de incidência cinza relativo .....	14
gicsg	grau de incidência cinza de semelhança geométrica .....	13
gicsint	grau de incidência cinza sintético .....	14
OGA	operador de geração de acúmulo (AGO em inglês) .....	15
OIGA	operador inverso de geração de acúmulo (IAGO em inglês) .....	15
SC	Sistemas Cinzas .....	4
st	série temporal .....	9
TC	Teoria da Complexidade .....	2
TSC	Teoria de Sistemas Cinzas .....	2

## RESUMO

ROCHA, P.S. Teoria de Sistemas Cinzas Aplicada ao Estudo de Variáveis Micrometeorológicas em uma Região de Cerrado. Cuiabá, 2013, 79f. Tese (Doutorado em Física Ambiental) - Instituto de Física, Universidade Federal de Mato Grosso.

O desenvolvimento de ferramentas que possibilitem o estudo de sistemas dinâmicos e abertos constitui a base da pesquisa científica em Física Ambiental. Com base nesta afirmação, o objetivo deste trabalho foi aplicar a Teoria de Sistemas Cinzas à análise de variáveis micrometeorológicas coletadas, por meio de sensores instalados em uma torre em uma área de cerrado, próximo a Cuiabá. Desenvolveu-se uma metodologia para aplicação da Teoria de Sistemas Cinzas que consiste na criação de rotinas computacionais implementando diversas partes desta teoria. Uma destas rotinas destina-se ao preenchimento de eventuais falhas existentes, decorrentes de problemas durante a etapa de coleta. Este processo de preenchimento apresentou resultados com precisão média superior a 95%. Desenvolveu-se também outras rotinas para o preparo destes dados, seguindo necessidades expostas na teoria. Após isto, calculou-se o grau de incidência cinza para 14 variáveis, par a par, utilizando estes índices para observar se a teoria era capaz de identificar fenômenos que ocorrem nestes sistemas. Como etapa final, foi possível definir, por meio destes índices e da construção de um espaço de fase, que para o mês de agosto de 2012 (correspondendo ao período de seca) duas variáveis carregam informações que possibilitam o estudo da dinâmica destes sistemas. O mesmo não ocorre para o período de dezembro de 2012 (correspondendo ao período chuvoso) onde o acoplamento da umidade torna necessária a inclusão de mais variáveis.

**Palavras-chave:** Sistemas Dinâmicos, Análise de Incidência Cinza, Preenchimento de Falhas.

## ABSTRACT

ROCHA, P.S. Grey System Theory Applied to the Study of Micrometeorological Variables in a Cerrado (Brazilian savannah) Region. Cuiabá, 2013, 79f. Thesis (Doctorate in Environmental Physics) - Physics Institute, Federal University of Mato Grosso.

The development of mathematical tools that make the study of open and dynamical systems possible is the base of Environmental Physics researches. Based on this statement, this work aims on the application of Grey System Theory to analyse micrometeorological variables collected, using sensors installed in a tower, at an area of cerrado (Brazilian savannah), near the city of Cuiabá. We developed a methodology for the application of Grey System Theory, which consists in the creation of computational routines implementing different parts of this theory. One of these routines is used to gap filling, that occurs due to problems during the collection phase. This process of gap filling presented results with average accuracy higher than 95%. We also developed routines to pre-process these data, preparing it to meet theory requirements. After this, grey incidence degree was calculated to 14 variables, pairwise. We used these indexes to see if the theory could identify phenomena that occurs in these systems. As a final step, it was possible to establish, through these indexes and the phase space construction, that only two variables carry enough information of the system in the month of August 2012 (dry-season). The same does not hold true for December 2012 (wet-season) where the coupling of moisture disturbs the system, creating the need of inclusion for more variables.

**Keywords:** Dynamical Systems, Grey Incidence Analysis, Gap Filling.

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 PROBLEMÁTICA

O sistema terrestre esteve e está sob a influência constante de mudanças, sejam elas de ocorrência natural ou não natural, cíclicas ou não cíclicas. Tais transformações se dão por meio de uma sucessão de processos e a reação à estas mudanças determina a quantidade de elementos capazes de estender sua existência neste complexo emaranhado de ligações que chamamos de Terra. Desastres naturais talvez sejam o exemplo mais claro da influência de tais mudanças nas configurações deste sistema, em especial ao homem, constituindo desafio recorrente na manutenção de nossa espécie como parte integrante deste arranjo. O sistema terrestre é formado por subsistemas abertos, dinâmicos, fora do equilíbrio e, constantemente, não lineares, o que pode explicar, em parte, nossa inabilidade em responder de maneira adequada ou, em casos extremos, antever estas mudanças, uma vez que a essência de nosso pensamento é determinístico. Como consequência, observa-se regularmente os efeitos nocivos imprimidos à humanidade por alguns fenômenos, tais como: furacões, enchentes, desertificações, queimadas (naturais ou não), terremotos entre outros.

O Brasil possui dimensões continentais e se caracteriza por conter seis biomas diferentes. Esta configuração representa o cerne do problema em ciência ambiental, como compreender as interações que regulam os fenômenos presentes em uma diversidade como esta. É possível entender os mecanismos responsáveis por mudanças que impactam diversos níveis dentro destes sistemas? Afinal, percebemos a existência de efeitos diretos que, por diversas vezes, definem o desenvolvimento sócio-econômico em uma determinada região.

O estado de Mato Grosso, com extensão territorial considerável e encerrando três dos seis biomas brasileiros, constitui sítio de pesquisa importante. Possui extensas áreas de cultivo, o que permite analisar o papel do efeito antropogênico nestas mudanças, além de áreas com a vegetação original preservada, possibilitando o estudo de fatores naturais presentes nestas transformações. Dentro deste cenário, é responsabilidade do Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental, da Universidade Federal de Mato Grosso, contribuir para a caracterização e compreensão dos fatores regionais que desempenham papel importante no estudo do sistema terrestre.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

Se a humanidade for capaz de compreender as relações e os processos que caracterizam os sistemas mencionados anteriormente, antes mesmo de determinar a extensão de suas ações, seria possível tomar decisões mais rápidas que possibilitariam a minimização dos impactos causados por tais processos, assim como a redução da ação antropogênica no desencadeamento destas mudanças. Entretanto, é necessário adotar teorias e ferramentas que permitam uma análise holística destes sistemas, visto que a abordagem determinística se mostra inconsistente ou ineficiente.

A Teoria da Complexidade (TC) compreende ciência com potencial para explicar estes arranjos. Seus princípios, especialmente os tangentes à sistemas adaptativos, com propriedades emergentes e de muitas subdivisões, fornecem uma abordagem interdisciplinar com ferramentas, *a priori*, aptas para análise, interpretação e compreensão dos diversos tipos de sistemas ambientais de maneira efetiva. Dentre as teorias com enfoque em sistemas com características complexas, a Teoria de Sistemas Cinzas (TSC) possui instrumentos potencialmente efetivos na análise de sistemas ambientais. O uso dos métodos contidos na TSC pode colaborar no desenvolvimento de um conjunto de ferramentas ou de uma metodologia capaz de abordar, eficientemente, o problema das mudanças presentes nos constituintes do sistema terrestre.

A TSC apresenta ainda vantagem sobre os principais métodos utilizados na literatura, especialmente os estatísticos, por não possuir restrições quanto o número de observações que se faz acerca de um sistema, nem tampouco sobre a distribuição que os dados oriundos destas observações deva possuir. Portanto, a TSC pode ser aplicada, usualmente, sem a necessidade de se cumprir certos pressupostos.

Baseado no exposto anteriormente, este trabalho tem como objetivo geral a análise de sistemas ambientais por meio da aplicação da TSC no estudo do comportamento de variáveis micrometeorológicas de uma região de cerrado.

Como objetivos específicos, tem-se:

- Levantar, dentro das ferramentas da TSC aquelas com potencial de aplicação ao banco de dados micrometeorológicos existente no Programa de Pós Graduação em Física Ambiental.
- Selecionar nos dados referentes ao ano de 2012, um mês com características representativas para o período de seca e um para o período de chuva.
- Desenvolver uma metodologia de preenchimento de falhas e pre-processamento, atendendo as necessidades descritas na TSC.

- Implementar, computacionalmente, todas as etapas necessárias a este preenchimento, bem como as demais etapas usadas na produção de índices utilizados no estudo destas variáveis.
- Identificar, por meio destes índices, fenômenos usualmente observados neste tipo de problema.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 TEORIA DE SISTEMAS CINZAS

#### 2.1.1 INTRODUÇÃO

Classifica-se um sistema de acordo com a quantidade e qualidade das informações disponíveis. Aqueles completamente conhecidos, onde todas as informações estão acessíveis são chamados de Sistemas Brancos. Se nenhuma informação pode ser acessada, estes sistemas são chamados de Sistemas Caixa-Preta. Entretanto, estas duas denominações servem como objeto ideal teórico, raramente fazem referência a sistemas reais afinal, nestes a informação é parcialmente conhecida e parcialmente desconhecida. Por mesclar características dos dois objetos (brancos e caixa-preta), estes podem ser classificados como Sistemas Cinzas (SC) (DENG, 1982).

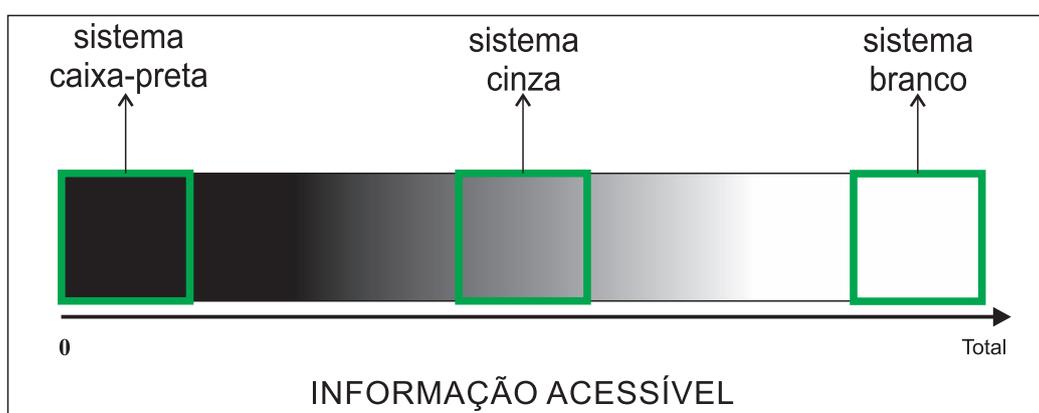


Figura 1 – Representação pictórica dos sistemas.

Com essa definição, feita pelo professor chinês Julong Deng, abriam-se os trabalhos para estabelecer o que hoje se conhece por Teoria de Sistemas Cinzas. Durante a década de 1980, Deng sistematizou e apresentou à comunidade científica as bases da TSC (DENG, 1988; DENG, 1989b; DENG, 1990b), oferecendo uma abordagem nova às soluções de problemas com temas transversais onde o acesso a informação fosse parcial. Esta incompletude da informação pode se manifestar nos elementos (ou parâmetros), na estrutura, nas fronteiras ou no comportamento de tais sistemas, o que observa-se constantemente nos objetos de estudo das ciências ambientais.

O cinza é, portanto, a essência contida nessa incompletude da informação (LIN et al., 2004). Um comparativo entre os tipos de sistemas mencionados pode ser visto na tabela 1, enquanto a figura 2 mostra a classificação da TSC utilizando um diagrama de Venn.

Tabela 1 – Comparação entre os tipos de sistemas (caixa-preta, cinza e branco) sob diferentes perspectivas. Fonte: Lin et al. (2004)

	Caixa-Preta	Cinzas	Brancos
Informação	Desconhecida	Incompleta	Conhecida
Aparência	Escura	Cinza	Clara
Processos	Novos	Substitutivos(velho pelo novo)	Velhos
Propriedade	Caótica	Complexa	Determinística
Metodologia	Negativa	Transitiva	Positiva
Atitude	Indulgência	Tolerância	Seriedade
Conclusão	Nenhuma	Soluções Múltiplas	Solução Única

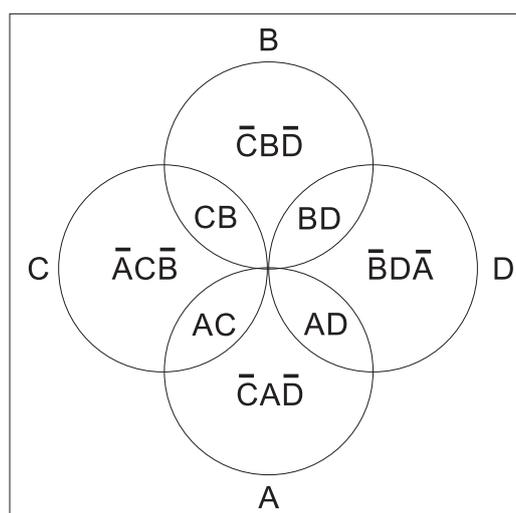


Figura 2 – Diagrama de Venn com o conjunto universal correspondendo à todos os possíveis objetos de estudo. A, B, C e D, são agregados de objetos de estudo simples, complexos, certos e incertos, respectivamente.  $\overline{BD\bar{A}}$  corresponde a TSC, sendo classificado como sistemas incertos semi-complexos. Fonte: Liu e Lin (2006).

Segundo Deng (1990a), as áreas de aplicações da TSC na China, no início da década de 1990 já incluíam: agricultura, ecologia, meteorologia, medicina, economia, geografia, indústria, manejo, ciências ambientais, biologia, entre outras. Fundamentalmente, a TSC se divide em ferramentas de análise, modelos de previsão, modelos de tomada de decisão, teoria dos jogos e teoria de controle. Na última década, existiam cerca de 20 universidades chinesas oferecendo a TSC em suas grades, no níveis de graduação e pós-graduação (LIU; FORREST, 2007).

Quanto a publicações, hoje existem dois periódicos em língua inglesa, um associado a *Emerald Links* com 2 anos de existência, e outro indexado pela ISI (Institute of Science Index) com mais de 20 anos, ambos dedicados exclusivamente a publicações envolvendo a TSC, além de um encontro periódico, organizado pela *IEEE*, responsável pela divulgação de trabalhos nas mais diversas áreas sobre teoria de sistemas, incluindo a TSC.

Na China é possível ainda encontrar uma Associação Nacional de Sistemas Cinzas, presidida emeritamente pelo professor Ju Long Deng e dirigida pelo professor Si Feng Liu, ambos grandes divulgadores e desenvolvedores das bases fundamentais da TSC. Nas próximas seções, é explorada as bases fundamentais para o desenvolvimento e aplicação das ferramentas da TSC, começando pelo desenvolvimento algébrico da teoria, seguindo para índices e modelos de análises do comportamento de sistemas, finalizando com o modelo clássico de previsibilidade largamente usado, especialmente nos países asiáticos.

### 2.1.2 ÁLGEBRA DE SISTEMAS CINZAS

Matematicamente as características dos SC podem ser representadas por intervalos numéricos. Afinal, conhecer os limites de um intervalo representa nossa capacidade em sintetizar a parte conhecida da informação, enquanto a impossibilidade de definir exatamente um ponto dentro deste intervalo mostra a parcela parcialmente desconhecida. Portanto, é preciso definir um elemento matemático que comporte esta especificidade. Usualmente, denota-se um número cinza pelo símbolo  $\otimes$ , subdividindo-se em vários tipos (DENG, 1988; LIU; LIN, 2010).

I - Número cinza com intervalo inferior:

$$\otimes \in [\underline{a}, +\infty) \text{ ou } \otimes (\underline{a}) \quad (2.1)$$

II - Número cinza com intervalo superior:

$$\otimes \in (-\infty, \bar{a}] \text{ ou } \otimes (\bar{a}) \quad (2.2)$$

III - Número cinza intervalar:

$$\otimes \in [\underline{a}, \bar{a}] \quad (2.3)$$

IV - Números pretos:

$$\otimes \in [-\infty, +\infty] \quad (2.4)$$

V - Números brancos:

$$\otimes \in [\underline{a}, \bar{a}] \text{ com } \underline{a} = \bar{a} \quad (2.5)$$

É possível definir então o conjunto básico de operações (LIU; LIN, 2006; LIU; LIN, 2010). Seja  $\otimes_1 \in [a, b]$  com  $a < b$  e  $\otimes_2 \in [c, d]$  com  $c < d$ , se  $\otimes_3$  resulta de uma operação entre  $\otimes_1$  e  $\otimes_2$ , logo  $\otimes_3 \in [e, f]$  e  $[e, f] \supset [a, b][c, d]$ . Para a operação de adição, temos

$$\otimes_1 + \otimes_2 \in [a + c, b + d], \quad (2.6)$$

com o elemento aditivo inverso dado por

$$-\otimes \in [-a, -b], \quad (2.7)$$

portanto, a operação de subtração é definida como

$$\otimes_1 - \otimes_2 = \otimes_1 + (-\otimes_2) \in [a - c, b - d], \quad (2.8)$$

define-se a multiplicação de dois números cinzas como:

$$\otimes_1 \times \otimes_2 \in [\min\{ac, ad, bc, bd\}, \max\{ac, ad, bc, bd\}], \quad (2.9)$$

onde  $\min\{\}$  e  $\max\{\}$  representam o valor mínimo e máximo de um certo conjunto de números, respectivamente. Se  $\otimes_1 \in [a, b]$ , com  $a \neq 0, b \neq 0$ , é possível definir um elemento inverso

$$\otimes_1^{-1} \in \left[ \frac{1}{a}, \frac{1}{b} \right], \quad (2.10)$$

tal que

$$\frac{\otimes_1}{\otimes_2} = \otimes_1 \times \otimes_2^{-1} \in \left[ \min \left\{ \frac{a}{c}, \frac{a}{d}, \frac{b}{c}, \frac{b}{d} \right\}, \max \left\{ \frac{a}{c}, \frac{a}{d}, \frac{b}{c}, \frac{b}{d} \right\} \right], \quad (2.11)$$

Para multiplicação por um escalar temos

$$k\otimes \in [k\underline{a}, k\bar{a}], \quad (2.12)$$

com  $\otimes \in [\underline{a}, \bar{a}]$ ,  $\underline{a} \leq \bar{a}$  e  $k$  sendo um número real e positivo. Para expoentes, procede-se de modo semelhante com

$$\otimes^k \in [\underline{a}^k, \bar{a}^k]. \quad (2.13)$$

### 2.1.3 KERNEL E GRAU DE ACINZAMENTO DE UM NÚMERO CINZA

**Definição 2.1** (LIU; LIN, 2006; LIU; LIN, 2010; LIU et al., 2012): Kernel de um número cinza ( $\hat{\otimes}$ ) é definido, para o intervalo contínuo mostrado equação 2.3, como:

$$\hat{\otimes} = \frac{1}{2}(\underline{a} + \bar{a}) \quad (2.14)$$

ou, para o caso de uma distribuição discreta, com  $a_i \in [\underline{a}, \bar{a}] (i = 1, 2, \dots, n)$  assumindo todos os valores possíveis dentro deste intervalo, temos:

$$\hat{\otimes} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_i. \quad (2.15)$$

**Definição 2.2** (LIU; LIN, 2006; LIU; LIN, 2010; LIU et al., 2012): Seja  $\Omega$  o universo de eventos que produz um número cinza,  $\mu(\Omega)$  a medida do tamanho deste universo e  $\mu(\otimes)$  o tamanho do campo associado à um número cinza, pertencente ao universo de eventos  $\Omega$ , define-se o grau de acinzentamento de um número cinza  $\otimes$  ( $g^\circ(\otimes)$ ) como:

$$g^\circ(\otimes) = \frac{\mu(\otimes)}{\mu(\Omega)}, \text{ ou simplesmente } g^\circ \quad (2.16)$$

com os seguintes axiomas (LIU; LIN, 2006; LIU; LIN, 2010; LIU et al., 2012)

**Axioma 2.1** : O grau de acinzentamento de um número cinza obedece a normalização, ou seja,  $0 \leq g^\circ \leq 1$ .

**Axioma 2.2** : Para um número branco, definido na equação 2.5,  $g^\circ(\otimes) = 0$ .

**Axioma 2.3** : E,  $g^\circ(\Omega) = 1$ . O universo de eventos de onde o número cinza emerge é, geralmente, conhecido. Nenhuma informação útil pode ser retirada neste caso.

**Axioma 2.4** : Para todas as operações envolvendo números cinzas, o grau de acinzentamento do número resultante não pode ser menor que o maior valor de  $g^\circ$  envolvido no processo (Grau de acinzentamento não-decrescente).

**Definição 2.3** (LIU; LIN, 2006; LIU; LIN, 2010; LIU et al., 2012): Com base no exposto nas definições 2.1 e 2.2 e nos axiomas acima, escreve-se um número cinza, em sua forma simplificada, por  $\hat{\otimes}_{(g^\circ)}$ . Este encerra toda a informação sobre o número.

Outros trabalhos mostram os processos de derivação e integração (LIU; FANG, 2006; LIU et al., 2010), equações algébricas e matriciais (LIU; LIN, 2006), números cinzas estendidos (YANG, 2007; YANG; LIU, 2011) e números cinzas generalizados (LIU et al., 2010; LIU et al., 2012). Estes fortalecem as bases teóricas da TSC e permite que outros aspectos sejam incorporados na teoria.

### 2.1.4 SÉRIE TEMPORAL E PREENCHIMENTO DE FALHAS

A TSC é orientada, inicialmente, ao estudo de séries e sequências indexadas do tipo

$$X = \{x(1), x(2), x(3), \dots, x(n)\} \quad (2.17)$$

se o indexador " $n$ " for algum intervalo específico de tempo, temos uma série temporal (st). Considere agora que esta sc, constituída por dados brutos, seja escrita como

$$X = \{x(1), x(2), x(3), \dots, x(k-1), x(k), x(k+1), x(n)\} \quad (2.18)$$

onde  $x(k)$  é o  $k$ -ésimo elemento,  $x(k-1)$  é a informação precedente,  $x(k+1)$  a informação posterior. Então, pode-se escrever o  $k$ -ésimo elemento como uma combinação das informações precedentes e posteriores (LIU; LIN, 2006; LIU; LIN, 2010):

$$x(k) = \eta x(k-1) + (1-\eta)x(k+1), \text{ para } \forall \eta \in [0, 1] \quad (2.19)$$

este método pode ser entendido como informação de vizinhos adjacentes. Nesta equação,  $\eta$  é um coeficiente de ponderação e é fácil perceber que se  $\eta \leftarrow 0$ , tem-se uma maior semelhança da  $k$ -ésima entrada com o valor futuro e para  $\eta \leftarrow 1$ , há mais influência do valor passado. Portanto, caso exista uma falha na posição  $k$  ( $\emptyset(k)$ ), esta pode ser preenchida usando a equação 2.19, apenas se estas descontinuidades na coleta dos dados for pequena e pouco extensa (i.e. o número de elementos indexados ausentes não pode ocorrer em posições próximas). Entretanto, uma alternativa se houver muitas falhas próximas, seria usar:

$$\eta = \frac{1}{k-1} \sum_{p=1}^{k-1} \frac{x(p)}{x(p-1)} \quad (2.20a)$$

$$x(k) = \eta x(k-1) \quad (2.20b)$$

### 2.1.5 ANÁLISE DE INCIDÊNCIA CINZA

O modelo de Análise de Incidência Cinza (AIC)(GIA, Grey Incidence Analysis, em inglês) é parte importante no estudo do comportamento de sistemas. Inicialmente proposto por Deng (1985), Deng (1989a), o método de AIC tem como hipótese fundamental a proposta de que quanto maior a proximidade relacional entre duas séries quaisquer, maior seria o seu nível de semelhança geométrica. Portanto, séries com geometrias próximas seriam também séries com um alto grau de correlação. Dentre as diversas aplicações observadas nas décadas seguintes,

destaca-se o uso da AIC na agricultura (JIANGUO et al., 1995; KE-PEI et al., 2010), na avaliação de maquinários industriais (LIN; LIN, 2002), na indústria aeronáutica (LI et al., 2011), na otimização do tratamento de dejetos (ZENG et al., 2007), na avaliação da matriz energética chinesa (WANG et al., 2008), na avaliação de emissão de poluentes (CHANG; LIN, 1999; LIN et al., 2007), na avaliação da qualidade do ar (PAI et al., 2007), na medicina (LIN, 2008), climatologia urbana (HUANG et al., 2010) entre outras.

### 2.1.5.1 Operadores de Sequências Cinzas

Segundo Liu e Lin (2006), Liu e Lin (2010), Liu et al. (2011) são necessárias algumas operações de pré-processamento, por meio de um conjunto de operadores que agem sobre as séries temporais. Seja  $X_i = \{x_i(1), x_i(2), \dots, x_i(n)\}$  uma série temporal qualquer,  $D_i$  um conjunto de operadores de sequências tal que  $X_i D_i = \{x_i(1)d_i, x_i(2)d_i, \dots, x_i(n)d_i\}$ , pode-se definir os seguintes operadores, como se segue:

I - Se,

$$x_i(k)d_1 = \frac{x_i(k)}{x_i(1)}, x_i(1) \neq 0, k = 1, 2, 3, \dots, n \quad (2.21)$$

$D_1$  é chamado de operador de inicialização, sendo  $X_i D_1$  a imagem inicializada de  $X_i$ .

II - Se,

$$x_i(k)d_2 = x_i(k) - x_i(1), k = 1, 2, 3, \dots, n \quad (2.22)$$

$D_2$  é o operador de zero inicial, sendo  $X_i D_2$  a imagem inicializada em zero de  $X_i$ .

III - Se,

$$x_i(k)d_3 = \frac{x_i(k)}{\bar{X}_i}, \text{ com } \bar{X}_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_i(k), k = 1, 2, 3, \dots, n \quad (2.23)$$

$D_3$  é o operador de normalização, sendo  $X_i D_3$  a imagem normalizada  $X_i$ . Outros operadores podem ser visto em Liu e Lin (2010).

### 2.1.5.2 Análise Relacional Cinza

Define-se por Análise Relacional Cinza (ARC), a avaliação do grau de sincronização da taxa de mudança de dois subsistemas. Se as relações causais básicas entre estes subsistemas forem similares, espera-se maiores valores neste índice (NG, 1994). Possibilita a investigação da dinâmica causal dos componentes do sistema, resultando no conhecimento dos processos dinâmicos que o caracteriza (LIU; LIN, 2006).

Seja  $X_o = \{x_o(1), x_o(2), \dots, x_o(n)\}$  a série temporal da variável que caracteriza um sistema e  $X_i = \{x_i(1), x_i(2), \dots, x_i(n)\}$  as séries temporais de fatores que influenciam na variável

característica, define-se o coeficiente relacional cinza (ou grau de incidência cinza) entre um elemento da série característica e um elemento na série de fatores por (DENG, 1985; LIU; LIN, 2006; LIU; LIN, 2010):

$$\gamma(x_0(k), x_i(k)) = \frac{\Delta_{min} + \xi \Delta_{max}}{\Delta_i(k) + \xi \Delta_{max}}, \quad (2.24)$$

onde

$$\Delta_i(k) = |x_0(k) - x_i(k)|, \quad (2.25)$$

é diferença absoluta entre um elemento na série característica  $X_0$  e o seu elemento correspondente no fator  $X_i$ ,

$$\Delta_{max} = \max_i \max_k \Delta_i(k), \quad (2.26a)$$

$$\Delta_{min} = \min_i \min_k \Delta_i(k), \quad (2.26b)$$

são, respectivamente, valores máximos e mínimos da diferença absoluta entre todos os elementos de todas as séries envolvidas na análise,  $\xi \in (0, 1)$  é o coeficiente de distinção, serve como parâmetro de ajuste.  $\gamma(x_0(k), x_i(k))$  também pode ser escrito como  $\gamma_{0i}$ . Pode-se estender este conceito à própria série, tomando-se a média dos coeficientes relacionais,

$$\gamma_{0i} = \frac{1}{P} \sum_{k=1}^P \gamma_{0i}(k), \quad (2.27)$$

onde  $\gamma_{0i}$  é o grau relacional entre  $X_i$  e  $X_0$ , satisfazendo:

- Normalidade -  $0 < |\gamma_{0i}| \leq 1$ ,  $\gamma_{0i} = 1 \Leftrightarrow X_0 = X_i$ .
- Completeza - Se  $\forall X_i, X_j \in X = \{X_q | q = 1, 2, 3, \dots, m; m \geq 2\}$ , geralmente,  $\gamma_{ij} \neq \gamma_{ji}$ ,  $i \neq j$ .
- Simetria de pares -  $\forall X_i, X_j \in X$ ,  $\gamma_{ij} = \gamma_{ji} \Leftrightarrow X = \{X_i, X_j\}$

Uma das principais utilidades da ARC, é a possibilidade de ordenar a importância dos fatores  $X_i$  na série característica  $X_0$ . Se  $\gamma_{03} \leq \gamma_{02}$ , pode-se concluir que o fator  $X_2$  tem maior importância na dinâmica do sistema caracterizado por  $X_0$  do que o fator  $X_3$  (LIU; LIN, 2006; LIU; LIN, 2010).

### 2.1.5.3 Grau de Similaridade e Proximidade de Incidência Cinza

Após compreender os fundamentos da AIC, pode-se empreender expressões matemáticas capazes de transformar informações de proximidade e semelhança geométrica em graus de incidência cinza, possibilitando uma análise mais detalhada de séries temporais. Para todo o processo de desenvolvimento matemático, segue-se o exposto por Liu et al. (2011), com melhorias nos modelos propostos anteriormente.

Seja  $X_i = \{x_i(1), x_i(2), \dots, x_i(n)\}$ , e  $D$  o operador da equação 2.22, denota-se a imagem inicializada em zero por:

$$X_i D = X_i^0 = \{x_i^0(1), x_i^0(2), \dots, x_i^0(n)\} \quad (2.28)$$

portanto, seguindo esta notação, pode-se escrever a imagem inicializada em zero de duas séries temporais:

$$X_i = \{x_i(1), x_i(2), \dots, x_i(n)\} \quad (2.29a)$$

$$X_j = \{x_j(1), x_j(2), \dots, x_j(n)\} \quad (2.29b)$$

como:

$$X_i^0 = \{x_i^0(1), x_i^0(2), \dots, x_i^0(n)\} \quad (2.30a)$$

$$X_j^0 = \{x_j^0(1), x_j^0(2), \dots, x_j^0(n)\} \quad (2.30b)$$

Defini-se então, os elementos diferença geométrica e diferença proximal, tal que:

$$|s_i - s_j| = \int_1^n (X_i^0 - X_j^0) dt \quad (2.31a)$$

$$|S_i - S_j| = \int_1^n (X_i - X_j) dt \quad (2.31b)$$

com as seguintes propriedades obedecidas:

- Se  $x_i^0(k) \geq x_j^0(k) \forall k = 1, 2, 3, \dots, n$ , então  $(s_i - s_j) \geq 0$ .
- Se  $x_i^0(k) \leq x_j^0(k) \forall k = 1, 2, 3, \dots, n$ , então  $(s_i - s_j) \leq 0$ .
- Se as duas séries se cruzam, o sinal de  $(s_i - s_j)$  não é fixo.

Caso duas séries  $X_i$  e  $X_j$  possuam o mesmo intervalo de tempo e o mesmo número de observações, define-se o grau de incidência cinza de semelhança geométrica (gicsg) por:

$$\epsilon_{ij} = \frac{1}{1 + |s_i - s_j|} \quad (2.32)$$

e o grau de incidência cinza de proximidade (gicp) como:

$$\rho_{ij} = \frac{1}{1 + |S_i - S_j|} \quad (2.33)$$

onde  $\epsilon$  e  $\rho$  satisfazem a normalidade, completeza e simetria de pares já mencionada anteriormente. Percebe-se que valores próximos de 1 para os dois índices, indicam alta semelhança geométrica e alta proximidade espacial. Isto permite extrair informações do comportamento do sistema, indicando como a dinâmica das séries, que representam uma variável característica do sistema estudado, estão relacionadas. Estas informações podem ser úteis na decisão de quais variáveis são importantes na construção de um modelo mais elaborado. Caso o intervalo entre duas observações sucessivas quaisquer seja sempre o mesmo, é possível reescrever as equações 2.31a e 2.31b:

$$|s_i - s_j| = \left| \frac{1}{2}(x_i^0(n) - x_j^0(n)) + \sum_{k=2}^{n-1} (x_i^0(k) - x_j^0(k)) \right| \quad (2.34a)$$

$$|S_i - S_j| = \left| \frac{1}{2}(x_i(n) - x_j(n)) + \sum_{k=2}^{n-1} (x_i(k) - x_j(k)) \right| \quad (2.34b)$$

Entretanto, caso o valor absoluto das entradas nas séries seja relativamente grande, os graus de incidência cinza (semelhança e proximidade) assumirão valores pequenos, segundo (LIU et al., 2011), isto não influencia a AIC, porém, caso seja necessário, convém adotar os grau de incidência cinza absoluto, relativo ou sintético entre duas séries  $X_i$  e  $X_j$  (LIU; LIN, 2006; LIU; LIN, 2010), a saber: I - grau de incidência cinza absoluto (gica)-

$$\hat{\epsilon}_{ij} = \frac{1 + |s_i| + |s_j|}{1 + |s_i| + |s_j| + |s_i - s_j|} \quad (2.35)$$

com

$$|s_i| = \int_1^n ((X_i^0) - x_i^0(k))dt \quad (2.36)$$

ou

$$|s_i| = \left| \sum_{k=2}^{n-1} (x_i^0(k)) + \frac{1}{2}(x_i^0(n)) \right| \quad (2.37)$$

e

$$|s_j| = \int_1^n ((X_j^0) - x_j^0(k))dt \quad (2.38)$$

ou

$$|s_j| = \left| \sum_{k=2}^{n-1} (x_j^0(k)) + \frac{1}{2}(x_j^0(n)) \right| \quad (2.39)$$

caso duas observações sucessivas possuam o mesmo intervalo de tempo para toda a série. Sendo  $X_i^0$  resultado da aplicação do operador mostrado na equação 2.22.

II - grau de incidência cinza relativo (gicr) é obtido quando as séries  $X_i$  e  $X_j$  são inicializadas pelo operador  $D$  apresentado na equação 2.21, temos a seguinte notação:

$$X_i D = X'_i = \{x'_i(1), x'_i(2), \dots, x'_i(n)\} \quad (2.40)$$

o gicr pode ser então definido por:

$$r_{ij} = \frac{1 + |s_i| + |s_j|}{1 + |s_i| + |s_j| + |s_i - s_j|} \quad (2.41)$$

com

$$|s_i| = \int_1^n ((X'_i) - x'_i(k))dt \quad (2.42)$$

ou

$$|s_i| = \left| \sum_{k=1}^{n-1} (x'_i(k)) + \frac{1}{2}(x'_i(n)) \right| \quad (2.43)$$

e

$$|s_j| = \int_1^n ((X'_j) - x'_j(k))dt \quad (2.44)$$

ou

$$|s_j| = \left| \sum_{k=1}^{n-1} (x'_j(k)) + \frac{1}{2}(x'_j(n)) \right| \quad (2.45)$$

ainda com

$$|s_i - s_j| = \left| \sum_{k=1}^{n-1} (x'_i(k) - x'_j(k)) + \frac{1}{2}(x'_i(n) - x'_j(n)) \right| \quad (2.46)$$

novamente com as propriedades de normalidade, completeza e simetria de pares. É importante ainda ressaltar que, para todos os graus de incidência mostrado até agora, um deslocamento horizontal qualquer (*time lag*) não altera o valor de  $\epsilon_{ij}$ ,  $\rho_{ij}$ ,  $\hat{\epsilon}_{ij}$  e  $r_{ij}$ .

Se combinarmos agora o grau de incidência cinza relativo com o absoluto, obtemos o grau de incidência cinza sintético (gicsint), dado por:

$$\sigma_{ij} = \theta \hat{\epsilon}_{ij} + (1 - \theta) r_{ij} \quad (2.47)$$

com  $\theta$  sendo uma constante de ponderação sob a perspectiva de qual dos graus de incidência possui maior impacto na análise das relações entre diversas variáveis.

### 2.1.6 MODELOS CINZAS DE PREVISÃO

De todas as ferramentas disponíveis dentro da TSC, os modelos de previsão talvez tenham sido os mais utilizados desde sua apresentação no final da década de 1980 (DENG, 1989b). Muitos são os exemplos de aplicação destes modelos na literatura, de particular interesse destacam-se o seu uso na agricultura (CHUAN; BINGPU, 2006), hidrologia (WANG et al., 2007; HAO et al., 2011), mudanças climáticas (HAO et al., 2006), meteorologia (ZHANG et al., 2009) dentre outros. Inúmeras foram as modificações feitas no modelo original, batizado de modelo cinza de primeira ordem e uma variável ( $GM(1, 1)$ ), em especial, cita-se os trabalhos de Kayacan e Kaynak (2011), Yang et al. (2012), Wu et al. (2012), Lian (2013), que incorporam aspectos de outras teorias (especialmente matemática *fuzzy* e operadores de ordem fractal). Discute-se nesta seção, as bases teóricas do modelo clássico. Entretanto, pequenas adaptações tornam possível o desenvolvimento de modelos mais específicos, tais como o aumento do número de variáveis inclusas no modelo original, a utilização dos erros residuais para aumentar o poder de previsibilidade e a escolha de outras equações diferenciais de ordem maior.

#### 2.1.6.1 O Modelo Cinza Clássico - $GM(1,1)$

Modelos cinzas de previsibilidade são fundamentados em dois operadores, o operador de geração de acúmulo (AGO em inglês) (OGA) e o operador inverso de geração de acúmulo (IAGO em inglês) (OIGA). Estes tem como finalidade a suavização da aleatoriedade dentro das séries. Fisicamente eles representam o fato de que, por mais que não se conheçam as funções que determinam a dinâmica do sistema, por mais que elas tenham características não lineares, o acúmulo de energia derivado da variabilidade das grandezas físicas envolvidas no problema será sempre mais suave que as funções originais (LIU; LIN, 2010). Seja  $X^{(0)} = \{x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(n)\}$ ,  $n \geq 4$ , uma série temporal representando as medições de uma certa grandeza física, escreve-se a série acumulada como (DENG, 1989b; LIU; LIN, 2010):

$$XD_r = X^{(r)} = \{x^{(0)}(1)d, x^{(0)}(2)d, \dots, x^{(0)}(n)d\}, n \geq 4 \quad (2.48)$$

ou

$$X^{(r)} = \{x(1)^{(r)}, x(2)^{(r)}, \dots, x(n)^{(r)}\}, n \geq 4 \quad (2.49)$$

o índice  $r$  representa a  $r$ -ésima operação de acumulo, para  $r = 1$ , tem-se:

$$x(k)^{(1)} = \sum_{i=1}^k x^{(0)}(i) \quad (2.50)$$

um comparativo entre  $X^{(0)}$  e  $X^{(1)}$  poder ser visto na figura 3. a sequência gerada média,  $Z^{(1)}$  em

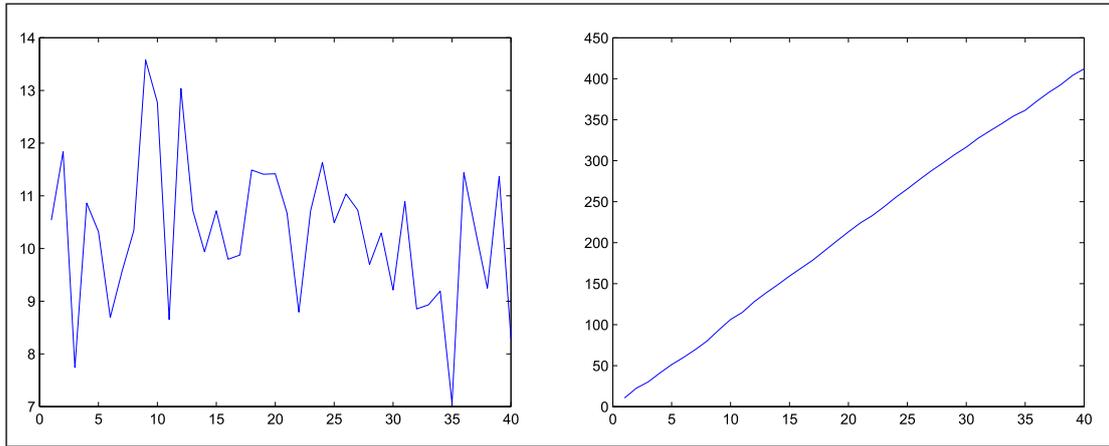


Figura 3 – A esquerda temos uma função dos dados aleatórios originais, a direita temos a mesma série processada com o OGA. Percebe-se uma nítida suavização da distribuição.

relação a  $X^{(1)}$ , é dada por:

$$Z^{(1)} = \{z^{(1)}(1), z^{(1)}(2), \dots, z^{(1)}(n)\} \quad (2.51)$$

onde  $z^{(1)}(k)$  é o valor médio de dois vizinhos adjacentes, ou seja

$$z^{(1)}(k) = 0,5x^{(1)}(k) + 0,5x^{(1)}(k-1) \text{ com } k = 2, 3, 4, \dots, n \quad (2.52)$$

A equação diferencial linear de primeira ordem, que pode ser aplicada a função produzida pela OGA, vista na figura 3, é:

$$\frac{dx^{(1)}(t)}{dt} + ax^{(1)}(t) = b \quad (2.53)$$

que, estimada pela sequência da diferença dos mínimos quadrados (DENG, 1989b), assume a forma:

$$x^{(0)}(k) + az^{(1)}(k) = b \quad (2.54)$$

nas duas equações acima,  $a$  e  $b$  são parâmetros, que podem ser calculados por

$$[a, b]^T = (B^T B)^{-1} B^T Y \quad (2.55)$$

com

$$Y = [x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(n)] \quad (2.56)$$

e

$$B = \begin{bmatrix} -z^{(1)}(2) & 1 \\ -z^{(1)}(3) & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -z^{(1)}(n) & 1 \end{bmatrix} \quad (2.57)$$

segundo a equação 2.53, sua solução pode ser dada por:

$$x_p^{(1)}(k+1) = \left[ x^{(0)}(1) - \frac{b}{a} \right] e^{-ak} + \frac{b}{a} \quad (2.58)$$

para obter o valor na série  $X^{(0)}$ , aplicase a OIGA (LIU; LIN, 2006; LIU; LIN, 2010), estabelecendo o seguinte modelo:

$$x_p^{(0)}(k+1) = \left[ x^{(0)}(1) - \frac{b}{a} \right] e^{-ak} (1 - e^a) \quad (2.59)$$

e o valor previsto na série original, em um tempo  $k+H$

$$x_p^{(0)}(k+H) = \left[ x^{(0)}(1) - \frac{b}{a} \right] e^{-a(k+H-1)} (1 - e^a) \quad (2.60)$$

Este é o modelo clássico GM(1,1), outras variantes foram desenvolvidas, como mencionadas anteriormente, com melhorias nos valores estimados (KAYACAN; KAYNAK, 2011), também encontram-se na literatura modelos de ordem maior, com mais variáveis (KAYACAN et al., 2010) e inúmeras outras modificações (KUMAR; JAIN, 2010). Neste trabalho utilizou-se apenas o modelo clássico.

## 2.2 RADIAÇÃO

Todos os processos biogeoquímicos que acontecem na superfície terrestre dependem da entrada de energia neste sistema. Esta entrada se dá por meio da radiação eletromagnética proveniente do Sol. Entende-se por radiação eletromagnética a energia transmitida de um ponto ao outro através de ondas eletromagnéticas, que são fenômenos de oscilações de campos elétricos e magnéticos.

A radiação eletromagnética tem uma característica bastante peculiar, ao se multiplicar a distância existente entre dois pontos nestas ondas que possuam a mesma fase (comprimento de onda ( $\lambda$ )) e o número de pulsos emitidos por uma fonte no intervalo de um segundo (frequência ( $\nu$ )), obtêm-se, no vácuo, sempre um valor constante. Esta constante é conhecida como velocidade da luz no vácuo ( $c$ ) e tem o valor de  $3 \times 10^8 \text{ms}^{-1}$ . Isto nos permite então avaliar a radiação eletromagnética por meio destas duas grandezas, através da equação:

$$c = \lambda\nu \quad (2.61)$$

onde o comprimento de onda é dado em metros ( $m$ ) e a frequência em Hertz ( $s^{-1}$ ).

Segundo a lei de Stephan-Boltzman, todo corpo com temperatura absoluta não nula emite radiação térmica. Se considerarmos apenas a radiação, um corpo com maior temperatura em um ambiente com temperatura menor irá resfriar pois, a taxa de emissão de radiação é maior do que a taxa de absorção. A intensidade com que um corpo emite radiação térmica é definida por:

$$R = \epsilon\sigma T^4 \quad (2.62)$$

aqui,  $R$  é a radiação térmica emitida em unidades de  $\text{Wm}^{-2}$ ,  $\epsilon$  é a constante adimensional de emissividade, que define o quanto da radiação absorvida o corpo irá re-emitir,  $\sigma$  é a constante de Stephan-Boltzman, com unidades de  $\text{Js}^{-1}\text{m}^{-2}\text{K}^{-4}$ .

### 2.2.1 BALANÇO DE RADIAÇÃO

Sabe-se que a radiação solar que atinge o topo da atmosfera é uma constante (aproximadamente  $1400\text{Wm}^{-2}$ ), entretanto, até chegar à superfície, esta radiação pode sofrer resistência. Após chegar a superfície, nem toda a energia contida na radiação está disponível ao sistema solo-planta-atmosfera para realizar os inúmeros processos que caracterizam o ambiente. A radiação solar interage com diversas partes deste sistema, em um ciclo de absorção, re-emissão e reflexão. Então, para saber qual é a energia total disponível ao sistema, devemos computar o saldo de radiação ( $R_n$ ), que é a diferença entre a energia recebida e perdida por uma determinada

superfície (ROSENBERG et al., 1983). Se separarmos a radiação solar em faixas, de acordo com o seu comprimento de onda, define-se balanço de ondas curtas (BOC) como sendo o saldo das radiações no intervalo de  $0,15\mu m$  a  $3,0\mu m$  e o balanço de ondas longas (BOL) aquela contida entre  $3,0\mu m$  a  $100,0\mu m$  (ARYA, 2001; MONTEITH; UNSWORTH, 2007). Matematicamente o saldo de radiação é a soma algébrica do BOC e BOL.

$$R_n = BOC - BOL \quad (2.63)$$

O saldo de radiação constitui parcela importante no desenvolvimento de métodos que estimam a perda de água de uma superfície vegetada, sendo fundamental para o planejamento agrícola (LEITÃO, 1989), além de fazer parte dos modelos de previsão climática e agrometeorologia (BISHT et al., 2005; BISHT; BRAS, 2010).

### 2.2.1.1 Balanço de Ondas Curtas

A radiação solar (de ondas curtas) que atravessa a atmosfera terrestre é conhecida como radiação global ( $R_g$ ). Parte desta radiação atinge a superfície diretamente e é chamada de radiação direta ( $R_d$ ), outra parte entretanto sofre difusão e leva o nome de radiação difusa ou radiação de céu ( $R_c$ ). Então, pode se escrever a  $R_g$  por

$$R_g = R_d + R_c \quad (2.64)$$

entretanto, nem toda a radiação global é absorvida pelo sistema solo-planta-atmosfera, a fração de energia que não é absorvida, mas sim refletida é denominada albedo ( $\alpha$ ). Levando em consideração então a radiação global como parcela positiva, entrando no sistema, e a parcela que é refletida de volta pra espaço, podemos calcular quanto de energia proveniente de ondas curtas efetivamente está disponível ao sistema por meio de:

$$BOC = R_g - \alpha R_g \quad (2.65)$$

e

$$\alpha = \frac{R_f}{R_g} \quad (2.66)$$

onde  $R_f$  representa a parcela da radiação global refletida pela superfície.

### 2.2.1.2 Balanço de Ondas Longas

No balanço de ondas longas, a contabilidade do fluxo de energias ascendentes e descendentes esta diretamente ligada a lei de Stephan-Boltzman, afinal a radiação re-emitada por todos

os corpos possui comprimento de onda de infravermelho distante, sendo considerada radiação termal. Se considerarmos positiva toda a radiação termal descendente e negativa a ascendente, pode-se computar a energia líquida proveniente deste tipo de radiação por:

$$BOL = E_a - E_s \quad (2.67)$$

onde  $E_a$  é a radiação termal emitida pela atmosfera e  $E_s$  é a radiação termal emitida pelo solo. Mas sabemos que radiação termal esta diretamente ligada a temperatura dos corpos, pela lei de Stephan-Boltzman. A equação 2.67 pode então ser reescrita, se tornando:

$$BOL = \epsilon_a \sigma_a T_a^4 - \epsilon_s \sigma_s T_s^4 \quad (2.68)$$

aqui os índices "a" e "s" referem-se a atmosfera e superfície, respectivamente. E comum considerar  $\epsilon_s$  muito próximo do valor unitário. A parcela de radiação termal proveniente da atmosfera é difícil de ser medida por envolver vários fatores que influenciam diretamente na emissividade tais como conteúdo de água no ar, cobertura do céu entre outros. Através da análise de eficiência de 28 modelos, Carrilho (2011) mostra em seu estudo, feito para uma região de cerrado na baixada cuiabana, que o modelo com maior correlação com os dados micrometeorológicos medidos naquele local, foi proposto por Satterlund (1979), que estima a emissividade por meio da pressão de vapor e da temperatura do ar. Entretanto, outros modelos empíricos são encontrados na literatura (SWINBANK, 1963; AASE; IDSO, 1978; PRATA, 1996).

De posse das equações utilizadas para calcular o balanço de ondas curtas e ondas longas, podemos então computar a parcela efetiva de energia disponível para todos os processos biogeoquímicos que mantém a vida em nosso planeta, por meio da seguinte equação:

$$R_n = R_g(1 - \alpha) - \epsilon_a \sigma_a T_a^4 + \epsilon_s \sigma_s T_s^4 \quad (2.69)$$

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 LOCAL DE ESTUDO

O sítio de coleta dos dados utilizados neste estudo situa-se em uma área particular, de propriedade do professor Clóvis Miranda, localizada 15km ao sul de Cuiabá ( $15^{\circ}43'53.69''\text{S}$  e  $56^{\circ}4'18.84''\text{O}$ ) na divisa com o município de Santo Antônio de Lerverger, conforme figura 4.

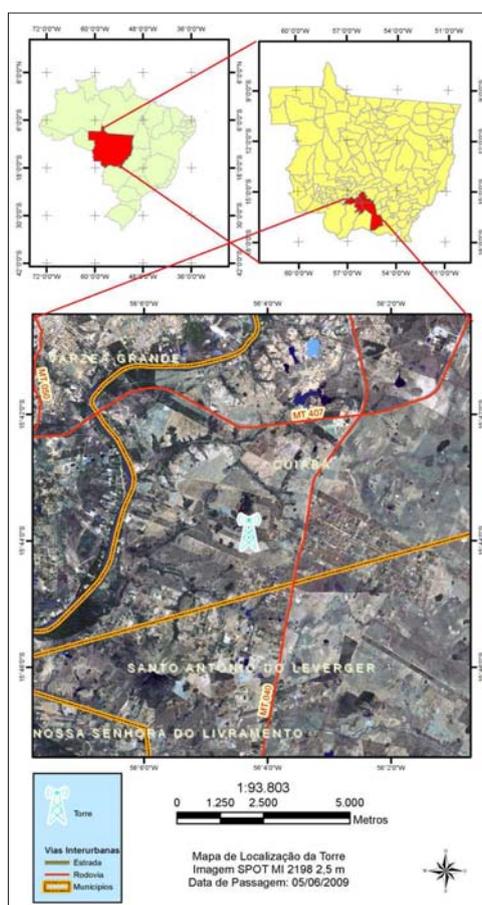


Figura 4 – Localização da torre micrometeorológica (Fonte: Wagner Rodrigues).

Situado à uma altitude média de 160 metros, em uma faixa de transição entre os biomas Cerrado e Pantanal, o sítio possui vegetação típica de Cerrado (figura 5). Na área de instalação da torre, encontra-se, majoritariamente, espécies herbáceas, surgidas após derrubada parcial da vegetação original.

A formação vegetal predominante no entorno é o Cerrado (com ocorrência de campo limpo até cerradão), apresentando floresta decídua na encosta dos morros e floresta de galeria ao longo dos rios, além de, em alguns trechos, vegetação típica de áreas alagadas (cambarazal (*Vochysia divergens*)).

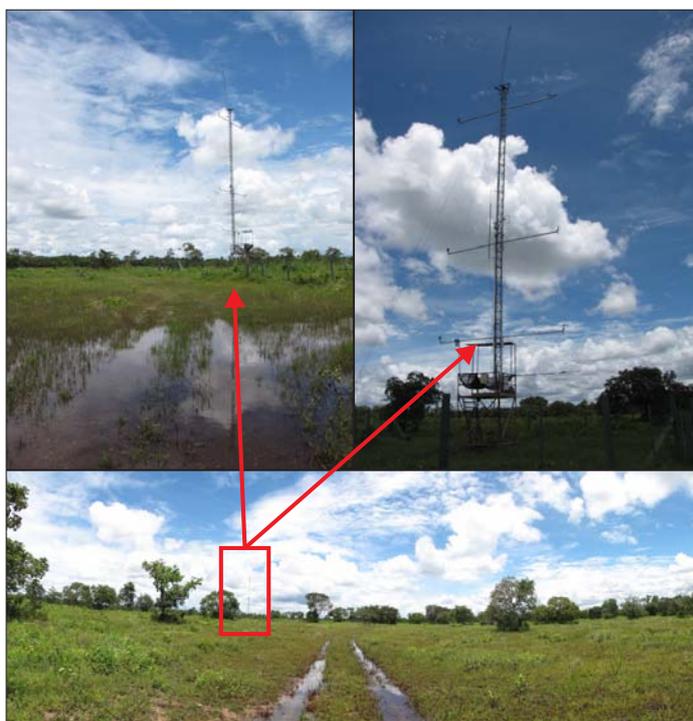


Figura 5 – Fotos da região de instalação da torre micrometeorológica (fonte: Paulo Henrique Zanella de Arruda).

O solo é, em sua maior parte, de superfície cascalhenta, pouco espesso, imperfeitamente drenado e concrecionário, características de PLINTOSSOLOS PÉTRICOS, podendo ocorrer, em algumas áreas, a presença de solos LITÓLICOS DISTRÓFICOS (EMBRAPA-CNPS, 2006).

O clima da região é caracterizado como aw segundo Köppen onde o período correspondente à primavera e verão (estação chuvosa) apresenta alto índice de umidade e baixa amplitude térmica entre dia e noite e durante o outono e inverno (estação seca), há uma queda drástica na umidade, que resulta em uma amplitude térmica maior entre dia e noite. A temperatura apresenta valores mínimos de aproximadamente 4°C e máxima ultrapassando os 40°C. O índice pluviométrico apresenta grandes diferenças entre as estações seca e chuvosa com média de precipitação anual de 1500 mm (SAMPAIO, 2006).

### 3.2 INSTRUMENTAÇÃO MICROMETEOROLÓGICA

No local de estudo, apresentado na seção anterior, foi instalada uma torre sensores de medição de dados micrometeorológicos, com recursos oriundos do projeto "Implantação de Postos de Observação de Gases-Traços e de Aerossóis na Atmosfera em Mato Grosso"(edital MCT-CNPq-CT Infra-CT Energ n. 07-2006; Processo de concessão do recurso: 620082/2006-2). Com estrutura metálica e aproximadamente 19 metros de altura (figura 6), os equipamentos instalados permitem a coleta e o armazenamento de dados meteorológicos 24 horas por dia.



Figura 6 – Detalhes da torre micrometeorológica de coleta de dados (fonte: Flair José de Carrilho Sobrinho).

Neste trabalho foram utilizados dados de temperatura do ar ( $T_{ar}$ ) e umidade relativa do ar ( $UR_{ar}$ ), medidos com termohigrômetros (modelo HMP45AC, Vaisala, Inc., Helsinki, Finland) instalados a alturas de 5, 10 e 18 metros. O saldo de radiação ( $Rn$ ) foi medido com um saldo radiômetro (modelo NR LITE, Kipp e Zonen Delft, Inc., The Netherlands) posicionado em uma altura de 4 metros. A 5 metros de altura funciona um pluviômetro de báscula (modelo TR-525M, Rainfall Sensor Texas Electronics, Inc., USA) medindo a precipitação ( $ppt$ ) acumulada.

Para os dados coletados no solo, utilizou-se um fluxímetro HFP01 (Rukseflux, Inc., The Netherlands), posicionado a uma profundidade de 1 centímetro, medindo o fluxo de calor no solo ( $G$ ). Para a temperatura do solo ( $T_{solo}$ ), foram utilizados termopares tipo T (modelo HFP01, Rukseflux, Inc., The Netherlands), as profundidades de 1, 3, 5, 10 e 20 centímetros. E por último, os dados de umidade do solo ( $UR_{solo}$ ) foram coletados por meio de um reflectômetro (modelo CS616 *Soil Moisture Sensor*, Campbell Scientific, Inc., USA) situado a 20 centímetros de profundidade.

Todos os dados coletados foram medidos em intervalos de 30 segundos e depois armazenados a cada 30 minutos em dois *dataloggers* (modelo CR 1000, Campbell Scientific, Inc., USA). O número de canais de entrada foi aumentado usando uma placa multiplexadora (modelo AM16/32<sup>a</sup>-ST-SW, Campbell Scientific, Inc., USA). A figura 7 ilustra os instrumentos instalados na torre.

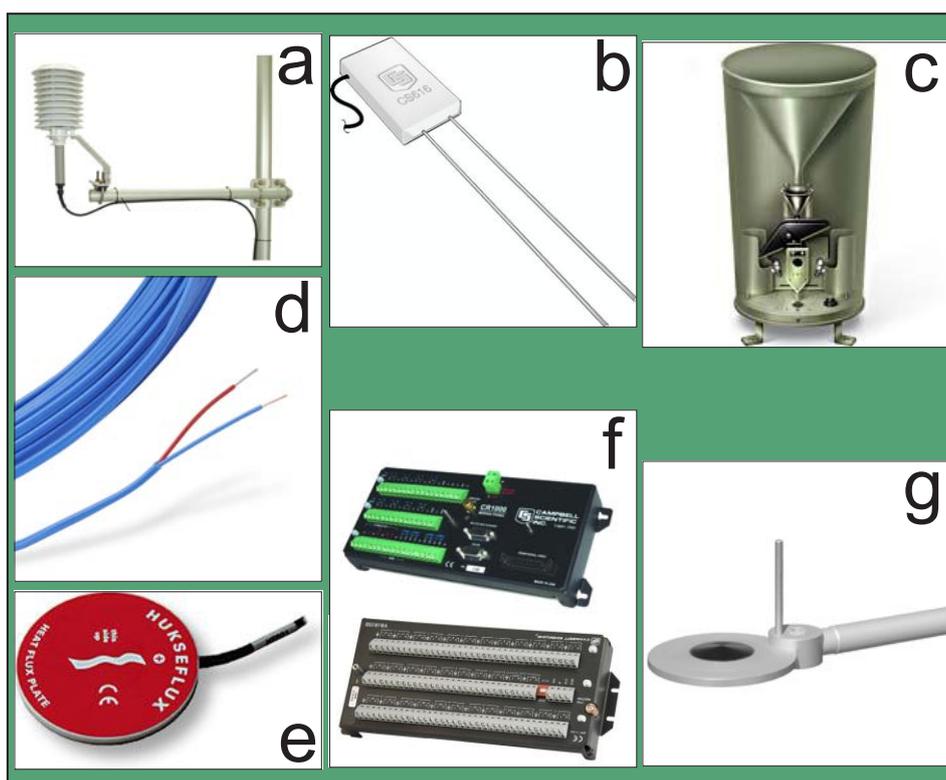


Figura 7 – Instrumentos instalados na torre micrometeorológica. Termohigrômetro (a), reflectômetro (b), pluviômetro (c), termopares (d), fluxímetro (e), datalogger e multiplexadora (f) e saldo radiômetro (g).

### 3.3 PRÉ-PROCESSAMENTO E ANÁLISE DOS DADOS

#### 3.3.1 Ferramenta Computacional

O advento dos computadores veio facilitar o trabalho científico simplificando, e em alguns casos possibilitando, a análise numérica e estatística de problemas até então insolúveis. Dentre as ferramentas computacionais utilizadas pela ciência, destaca-se o uso de linguagens de programação para implementar e modelar situações-problema nas mais diversas etapas do processo científico. A linguagem de programação de alto nível **MATLAB**<sup>®</sup> (The Mathworks, Inc., USA) tem se tornado popular entre os grupos de pesquisa, especialmente pelo seu conceito de que se pode representar os dados em forma matricial, realizando assim a maior parte das operações de cálculo numérico por meio de álgebra linear. Neste trabalho, desenvolveu-se, em **MATLAB**<sup>®</sup>, algumas rotinas para o pré-processamento e análise dos dados coletados descritos anteriormente utilizando métodos da TSC. Nas próximas seções, descreve-se estas etapas e um resumo conforme figura 8.

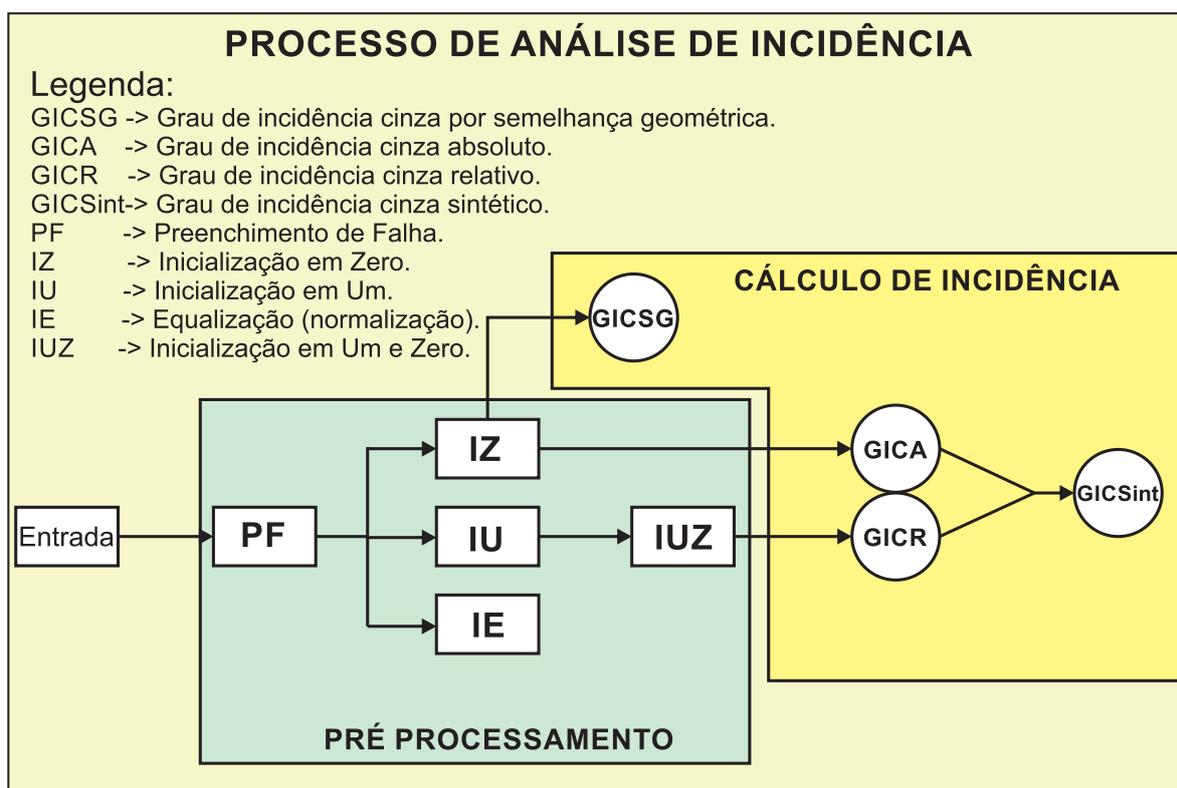


Figura 8 – Layout do processo de cálculo da análise de incidência cinza.

### 3.3.2 Entrada dos Dados

A amostra total de dados corresponde ao período de janeiro a dezembro de 2012, entretanto, para efeito de estudo de caso, escolheu-se um mês representando o período chuvoso e um representado o período de seca. A escolha foi feita com base no total de precipitação acumulada, sendo selecionado o segundo mês consecutivo de um intervalo de dois meses com o maior (menor) volume de chuva, para que efeitos do excesso (escassez) de água estivessem presentes nas variáveis micrometeorológicas. O total de precipitação acumulada para os doze meses de 2012 pode ser visto na tabela 2, em negrito aparecem os meses escolhidos como representativos usados nos cálculos a seguir.

Tabela 2 – Precipitação acumulada no ano de 2012.

Mês	ppt (mm)
Janeiro	124,5
Fevereiro	174,9
Março <sup>1</sup>	50,7
Abril	62,6
Maió	101,1
Junho	51,7
Julho	0
<b>Agosto</b>	<b>0</b>
Setembro	34,1
Outubro	26,3
Novembro	203,6
<b>Dezembro</b>	<b>141,6</b>

Após esta escolha, os dados referentes aos meses de agosto (seca) e dezembro (chuva) foram importados para o ambiente de trabalho do **MATLAB**<sup>®</sup>, sendo criado três vetores coluna para as temperaturas as alturas de 5 m, 10 m e 18 m ( $T_{ar5}$ ,  $T_{ar10}$  e  $T_{ar18}$ ); três vetores para as umidades relativas do ar as mesmas alturas ( $UR_{ar5}$ ,  $UR_{ar10}$  e  $UR_{ar18}$ ); dez vetores para a temperatura do solo as profundidades de 1 cm, 3 cm, 5 cm, 10 cm e 20 cm ( $T_{solo1}$ ,  $T_{solo3}$ ,  $T_{solo5}$ ,  $T_{solo10}$  e  $T_{solo20}$ ) sendo cinco para cada tipo de solo presente no estudo; dois vetores para umidade do solo ( $U_{solo}$ ) seguindo o mesmo padrão utilizado na temperatura do solo; um vetor para o fluxo de calor no solo ( $G$ ) e um para o saldo de radiação ( $Rn$ ). Cada um destes vetores possui cerca de 1488 elementos, onde cada uma destas entradas representa um período de trinta minutos.

<sup>1</sup>Por problemas técnicos, o mês de março possui apenas 15 dias de medições.

### 3.3.3 Pré Processamento

#### 3.3.3.1 Investigação e Preenchimento de Falhas

Através da rotina *investiga.m*, uma análise inicial dos dados foi feita para verificar a existência de falhas e transformar os vetores coluna em vetores linha (necessários aos cálculos utilizados), além de fornecer a lista com os demais comandos que devem ser utilizados. Com as séries no formato requerido procedeu-se o preenchimento de eventuais falhas existentes.

Inúmeras técnicas de preenchimento de falhas podem ser encontradas na literatura (FALGE et al., 2001a; FALGE et al., 2001b; HUI et al., 2004; MOFFAT et al., 2007) entretanto, neste trabalho, elaborou-se uma metodologia que aproveitasse as características da TSC. O procedimento corresponde a um processo de janelamento, onde não se usa todos os valores observados para as variáveis mas apenas uma pequena janela temporal representando um período de seis horas (doze entradas).

As rotinas *mediaglobal.m* e *gm11.m* varrem a série temporal, identificando a posição das falhas, criando então uma nova série com apenas onze observações e a falha encontrada na décima segunda posição. Após esta etapa, o algoritmo então aplica a equação 2.20 e o procedimento descrito na seção 2.1.6.1, usando as dez primeiras entradas para a calibragem das constantes presentes e a décima primeira entrada para definir o erro estimado percentual mínimo (EEM) que se comete ao preencher a falha na décima segunda posição, definido por:

$$EEM = \frac{|valor\_estimado - valor\_real|}{|valor\_real|} \times 100\% \quad (3.1)$$

compara-se então os valores para os EEM obtidos usando, dos dois métodos, aquele com menor erro estimado. Devolve-se então o valor estimado para a falha, seguindo a varredura e repetindo o procedimento para cada falha subsequente encontrada, como pode ser visto na representação esquemática da figura 9.

Com este procedimento, tentou-se minimizar a influência de ruídos e utilizar o poder de previsibilidade presente na TSC, onde apenas quatro entradas são necessárias para prever a quinta (DENG, 1982). Desta maneira, não foi preciso adotar técnicas avançadas, uma vez que os modelos de previsibilidade de primeira ordem para uma variável, presente na TSC não comporta dados que possuam sazonalidade (TSENG et al., 2001) e o processo de janelamento parece adequado neste caso.

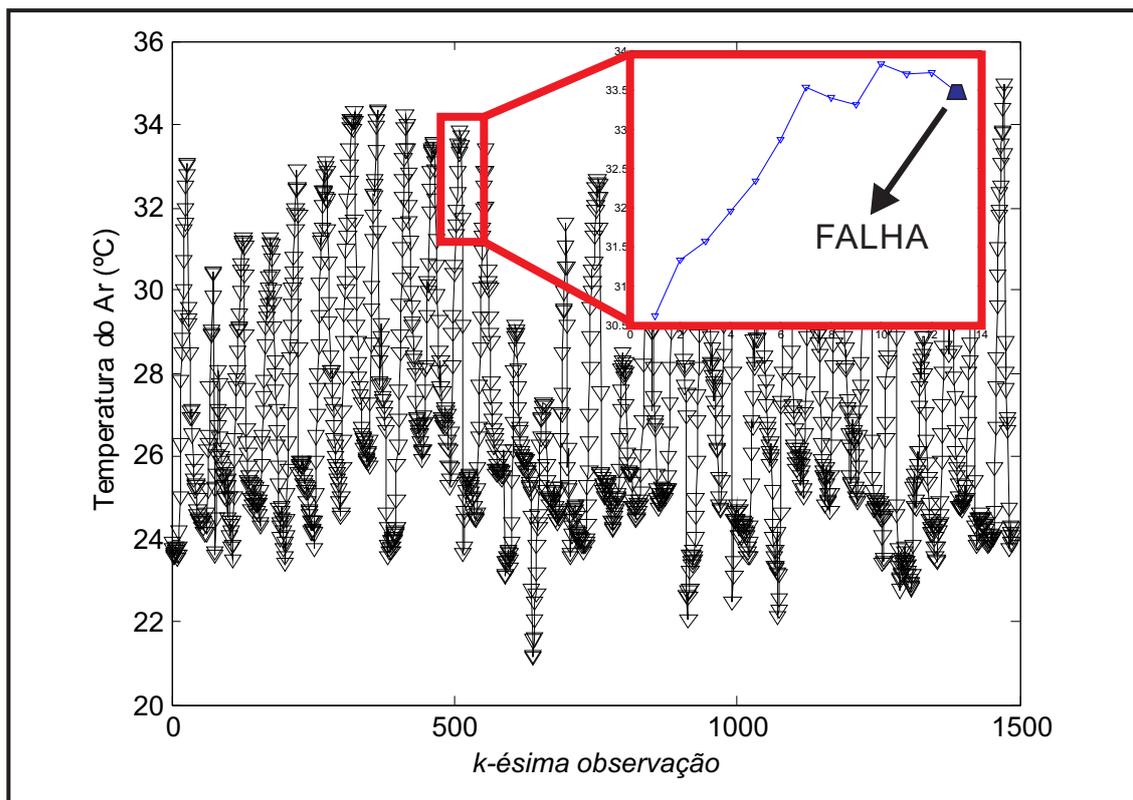


Figura 9 – Representação esquemática do processo de janelamento

### 3.3.3.2 Processos de Inicialização das Séries

Cada uma das variáveis passou por três processos de inicialização, necessários para realização da AIC. O cálculo do grau de incidência cinza absoluto exige que as séries de entrada possuam o primeiro elemento nulo, portanto as variáveis foram submetidas à operação de geração de sequência cinza descrita pela equação 2.22 com o uso da função *imagemzero.m*. O grau de incidência cinza relativo requer duas aplicações de operadores de geração, primeiro inicia-se as séries em elemento unitário, por meio da equação 2.21 usando a função *imagemum.m* e sequencialmente inicia-se com elemento nulo, por meio da equação 2.22. O grau de incidência cinza, sob a ótica da semelhança geométrica necessita apenas que as variáveis de entrada possuam elemento inicial unitário, sendo necessário apenas a aplicação da equação 2.21. A figura 10 mostra a comparação visual entre uma variável original e suas imagens inicializadas.

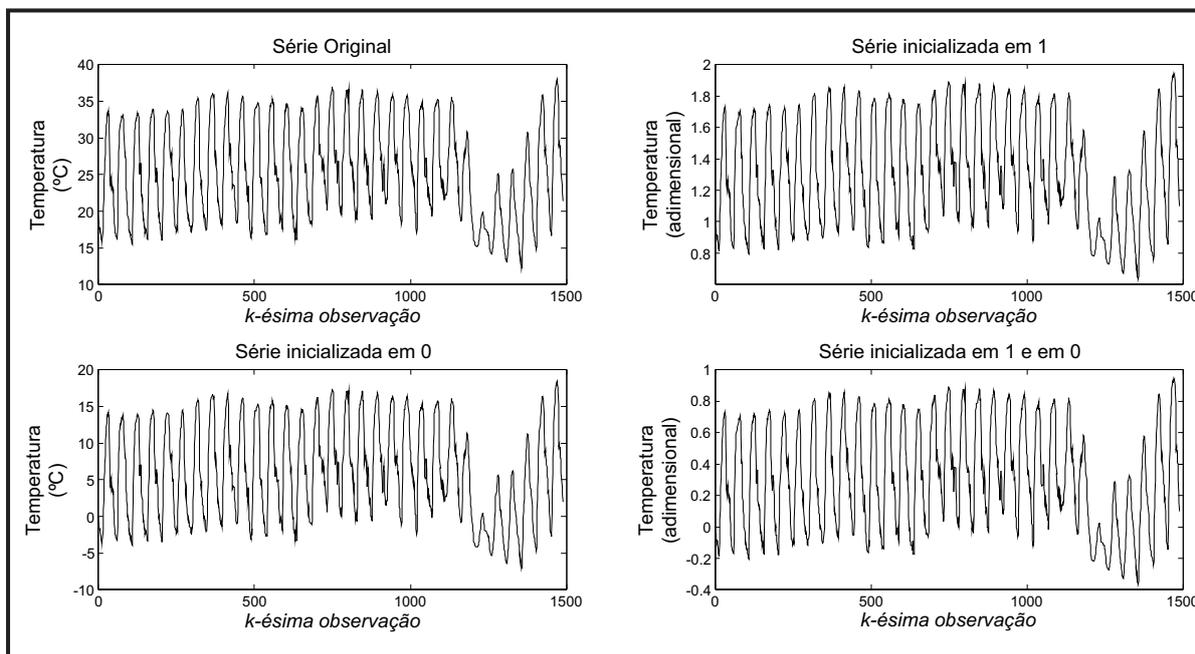


Figura 10 – Comparação entre a série original e suas imagens inicializadas.

### 3.3.3.3 Cálculo do Grau de Incidência Cinza

Após criadas as imagens inicializadas das variáveis, procedeu-se o cálculo dos graus de incidência cinza. A série inicializada em elemento nulo é passada como argumento para as funções *gica.m* e *gicsg.m*, enquanto a série inicializada em elemento unitário é usada na função *gicpe.m* e a rotina *gicr* tem como entrada as variáveis duplamente inicializadas em elemento unitário e elemento nulo.

Para as funções *gica.m* e *gicr.m* utiliza-se as equações 2.35 e 2.41 sem modificações. Entretanto, as rotinas *gicpe.m* e *gicsg.m* utilizam as equações 2.33 e 2.32 com modificações, como sugerido por Liu et al. (2011), se tornando:

$$\epsilon_{ij} = \frac{1 + |N \times \max(X1, X2)|}{1 + |N \times \max(X1, X2)| + |s_i - s_j|} \quad (3.2)$$

e

$$\rho_{ij} = \frac{1 + |N \times \max(X1, X2)|}{1 + |N \times \max(X1, X2)| + |S_i - S_j|} \quad (3.3)$$

onde  $N$  representa o número de observações de cada variável e  $\max(X1, X2)$  seleciona o elemento com maior valor absoluto entre as duas séries de entrada  $X1$  e  $X2$ . O restante dos símbolos

continua com o mesmo significado já discutido anteriormente. Vale ressaltar que esta modificação é necessária para uma melhor visualização dos graus de incidência, uma vez que as equações 2.33 e 2.32 dependem dos valores absolutos registrados em cada série. Portanto, com o número de observações relativamente grande nos dados (cerca de 1400 observações por variável),  $\epsilon_{ij}$  e  $\rho_{ij}$  tornam-se pequenos, dificultando a AIC.

Finalmente, com os graus de incidência cinza absoluto e relativo, calculou-se o grau de incidência cinza sintético usando a equação 2.47.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 PREENCHIMENTO DE FALHAS

A análise de séries temporais de variáveis micrometeorológicas fornece informações importantes sobre a dinâmica dos sistemas ambientais onde tais variáveis foram observadas/estimadas. Entretanto, equipamentos de coleta de dados podem apresentar mau funcionamento, acarretando interrupções na coleta que gera falhas nas séries temporais. Estas falhas podem prejudicar o estudo de propriedades destes sistemas portanto, uma teoria que seja factível no estudo destas séries deve ter ferramentas capazes de estimar estes dados ausentes, ou então que estas possam ser modificadas para atingir este objetivo.

Para testar a capacidade de preenchimento de falhas das ferramentas presentes na TSC, uma série temporal relativa aos dados de temperatura do ar a altura de 5 metros teve 250 de suas 1488 entradas substituídas por valores não existentes. O resultado do preenchimento, como descrito na metodologia deste trabalho, conforme figura 11.

Das 250 falhas preenchidas, 106 (42,4%) foram estimadas com precisão de 99%, 216 (86,4%) ficaram com precisão superior a 95%. Se a tolerância for elevada para um precisão mínima de 90%, 238 (95,2%) estimativas atingem este patamar. Apenas 12 (4,8%) dos resultados apresentam precisão menor que 90% e destas, apenas 4 (1,6%) caem para 80%. Dos 250 resultados, nenhum apresentou precisão menor do que 80%, sendo que o maior erro encontrado no preenchimento foi 17,37% e o menor foi 0,0015%. Comparado com outros trabalhos que utilizam diversas técnicas de preenchimento de falhas para dados de fluxos de energia (FALGE et al., 2001b), um erro médio de 2,54% se mostra satisfatório, demonstrando uma possível utilização das ferramentas presentes na TSC, especialmente os modelos de previsibilidade, para melhorar a estimativa no preenchimento de valores ausentes.

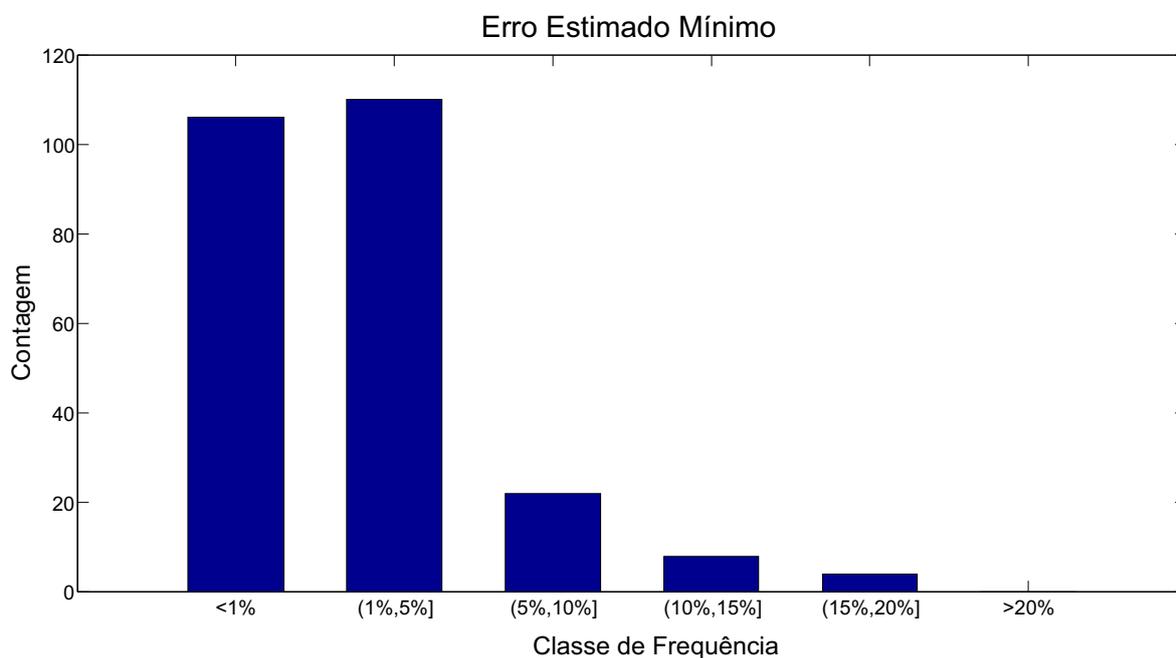


Figura 11 – Resultado do preenchimento de falhas. O eixo horizontal apresenta um agrupamento em classes de frequência de acordo com o EEM cometido ao se preencher cada falha. O eixo vertical apresenta a contagem de elementos presentes em cada um destes agrupamentos.

## 4.2 ANÁLISE DE INCIDÊNCIA

Como mencionado anteriormente, a AIC é uma parte importante dentre as ferramentas de análise de sistemas em geral. Seu poder já foi comprovado em diferentes áreas do conhecimento como visto em [Chang e Lin \(1999\)](#), [Zhang et al. \(2005\)](#), [Huang et al. \(2010\)](#), [Hao et al. \(2011\)](#) entre outros. A AIC está baseada na classificação de incidência (importância relacional) entre diversas variáveis que compõem um sistema complexo. No caso de dados micrometeorológicos, a AIC deve ser capaz de identificar, por meio do grau de incidência de uma variável em outra, fenômenos naturais conhecidos, comprovando a possibilidade de sua aplicação para investigar outros fenômenos que ainda sejam pouco familiares.

A tabela 3 apresenta um resumo das variáveis utilizadas no cálculo dos graus de incidência, bem como as legendas das tabelas seguintes. A apresentação dos resultados está separada por período (seco e chuvoso).

Tabela 3 – Legenda das variáveis micrometeorológicas usadas nos cálculos.

Símbolo	Significado
$R_n$	Saldo de radiação
$T_{ar5}$	Temperatura do ar a 5 metros
$UR_{ar5}$	Umidade relativa do ar a 5 metros
$T_{ar10}$	Temperatura do ar a 10 metros
$UR_{ar10}$	Umidade relativa do ar a 10 metros
$T_{ar18}$	Temperatura do ar a 18 metros
$UR_{ar18}$	Umidade relativa do ar a 18 metros
$G$	Fluxo de calor no solo
$T_{solo1}$	Temperatura do solo a profundidade de 1 cm
$T_{solo3}$	Temperatura do solo a profundidade de 3 cm
$T_{solo5}$	Temperatura do solo a profundidade de 5 cm
$T_{solo10}$	Temperatura do solo a profundidade de 10 cm
$T_{solo20}$	Temperatura do solo a profundidade de 20 cm
$U_{solo}$	Umidade do solo

#### 4.2.1 Apresentação das Matrizes de Coeficientes de Incidência

Os coeficientes de incidência cinza para o mês de agosto (representativo do período seco) podem ser encontrados nas tabelas 4, 5, 6 e 7. Para as quatro tabelas, as letras "a" e "b" indicam que as variáveis referentes ao solo são oriundas de solo pedregoso e arenoso, respectivamente.

Já coeficientes de incidência cinza para o mês de dezembro (representativo do período chuvoso) encontram-se nas tabelas 8, 9, 10 e 11. Novamente, as letras "a" e "b" indicam que as variáveis referentes ao solo são oriundas de solo pedregoso e arenoso, respectivamente.

Tabela 4 – Matriz de incidência cinza por semelhança geométrica - agosto 2012a

	$R_n$	$T_{ar5}$	$UR_{ar5}$	$T_{ar10}$	$UR_{ar10}$	$T_{ar18}$	$UR_{ar18}$	$G$	$T_{solo1}$	$T_{solo3}$	$T_{solo5}$	$T_{solo10}$	$T_{solo20}$	$U_{solo}$
$R_n$	1,000													
$T_{ar5}$	0,680	1,000												
$UR_{ar5}$	0,585	0,136	1,000											
$T_{ar10}$	0,677	0,916	0,124	1,000										
$UR_{ar10}$	0,588	0,141	0,971	0,129	1,000									
$T_{ar18}$	0,677	0,896	0,121	0,974	0,125	1,000								
$UR_{ar18}$	0,586	0,139	0,990	0,126	0,981	0,122	1,000							
$G$	0,720	0,712	0,343	0,699	0,349	0,696	0,345	1,000						
$T_{solo1}$	0,679	0,980	0,124	0,938	0,129	0,917	0,127	0,710	1,000					
$T_{solo3}$	0,676	0,873	0,102	0,946	0,106	0,969	0,104	0,693	0,892	1,000				
$T_{solo5}$	0,674	0,793	0,081	0,844	0,085	0,857	0,083	0,679	0,809	0,881	1,000			
$T_{solo10}$	0,672	0,732	0,062	0,766	0,065	0,774	0,064	0,667	0,743	0,788	0,861	1,000		
$T_{solo20}$	0,670	0,677	0,040	0,699	0,043	0,702	0,042	0,655	0,685	0,708	0,745	0,811	1,000	
$U_{solo}$	0,667	0,602	0,003	0,609	0,005	0,606	0,005	0,638	0,605	0,602	0,600	0,596	0,586	1,000

Tabela 5 – Matriz de incidência cinza por semelhança geométrica - agosto 2012b

	$R_n$	$T_{ar5}$	$UR_{ar5}$	$T_{ar10}$	$UR_{ar10}$	$T_{ar18}$	$UR_{ar18}$	$G$	$T_{solo1}$	$T_{solo3}$	$T_{solo5}$	$T_{solo10}$	$T_{solo20}$	$U_{solo}$
$R_n$	1,000													
$T_{ar5}$	0,680	1,000												
$UR_{ar5}$	0,585	0,136	1,000											
$T_{ar10}$	0,677	0,916	0,124	1,000										
$UR_{ar10}$	0,588	0,141	0,971	0,129	1,000									
$T_{ar18}$	0,677	0,896	0,121	0,974	0,125	1,000								
$UR_{ar18}$	0,586	0,139	0,990	0,126	0,981	0,122	1,000							
$G$	0,753	0,704	0,435	0,696	0,441	0,694	0,437	1,000						
$T_{solo1}$	0,684	0,882	0,167	0,831	0,173	0,819	0,170	0,721	1,000					
$T_{solo3}$	0,680	0,977	0,138	0,905	0,143	0,888	0,141	0,706	0,900	1,000				
$T_{solo5}$	0,677	0,914	0,115	0,996	0,120	0,981	0,117	0,696	0,830	0,903	1,000			
$T_{solo10}$	0,673	0,749	0,070	0,788	0,074	0,798	0,072	0,679	0,725	0,757	0,798	1,000		
$T_{solo20}$	0,670	0,686	0,045	0,710	0,048	0,713	0,047	0,671	0,681	0,698	0,719	0,816	1,000	
$U_{solo}$	0,667	0,607	0,002	0,615	0,004	0,613	0,004	0,660	0,624	0,623	0,622	0,620	0,614	1,000

Tabela 6 – Matriz de incidência cinza sintética - agosto 2012a

	$R_n$	$T_{ar5}$	$UR_{ar5}$	$T_{ar10}$	$UR_{ar10}$	$T_{ar18}$	$UR_{ar18}$	$G$	$T_{solo1}$	$T_{solo3}$	$T_{solo5}$	$T_{solo10}$	$T_{solo20}$	$U_{solo}$
$R_n$	1,000													
$T_{ar5}$	0,512	1,000												
$UR_{ar5}$	0,540	0,500	1,000											
$T_{ar10}$	0,510	0,900	0,500	1,000										
$UR_{ar10}$	0,542	0,500	0,982	0,500	1,000									
$T_{ar18}$	0,509	0,874	0,500	0,967	0,500	1,000								
$UR_{ar18}$	0,544	0,500	0,977	0,500	0,983	0,500	1,000							
$G$	0,647	0,563	0,599	0,553	0,602	0,550	0,607	1,000						
$T_{solo1}$	0,511	0,914	0,500	0,947	0,500	0,957	0,500	0,560	1,000					
$T_{solo3}$	0,509	0,817	0,500	0,895	0,500	0,922	0,500	0,547	0,882	1,000				
$T_{solo5}$	0,507	0,738	0,500	0,796	0,500	0,816	0,500	0,536	0,786	0,874	1,000			
$T_{solo10}$	0,505	0,670	0,500	0,711	0,500	0,725	0,500	0,526	0,704	0,766	0,856	1,000		
$T_{solo20}$	0,503	0,603	0,500	0,627	0,500	0,636	0,500	0,516	0,623	0,661	0,715	0,802	1,000	
$U_{solo}$	0,504	0,500	0,528	0,500	0,527	0,501	0,526	0,511	0,500	0,501	0,501	0,501	0,501	1,000

Tabela 7 – Matriz de incidência cinza sintética - agosto 2012b

	$R_n$	$T_{ar5}$	$UR_{ar5}$	$T_{ar10}$	$UR_{ar10}$	$T_{ar18}$	$UR_{ar18}$	$G$	$T_{solo1}$	$T_{solo3}$	$T_{solo5}$	$T_{solo10}$	$T_{solo20}$	$U_{solo}$
$R_n$	1,000													
$T_{ar5}$	0,512	1,000												
$UR_{ar5}$	0,540	0,500	1,000											
$T_{ar10}$	0,510	0,900	0,500	1,000										
$UR_{ar10}$	0,542	0,500	0,982	0,500	1,000									
$T_{ar18}$	0,509	0,874	0,500	0,967	0,500	1,000								
$UR_{ar18}$	0,544	0,500	0,977	0,500	0,983	0,500	1,000							
$G$	0,676	0,540	0,597	0,533	0,600	0,532	0,605	1,000						
$T_{solo1}$	0,516	0,907	0,500	0,824	0,500	0,802	0,500	0,553	1,000					
$T_{solo3}$	0,512	0,945	0,500	0,929	0,500	0,900	0,500	0,542	0,878	1,000				
$T_{solo5}$	0,510	0,865	0,500	0,954	0,500	0,965	0,500	0,533	0,793	0,887	1,000			
$T_{solo10}$	0,505	0,694	0,500	0,741	0,500	0,758	0,500	0,518	0,655	0,705	0,765	1,000		
$T_{solo20}$	0,503	0,616	0,500	0,644	0,500	0,654	0,500	0,511	0,593	0,622	0,658	0,797	1,000	
$U_{solo}$	0,500	0,515	0,500	0,520	0,500	0,522	0,500	0,500	0,513	0,518	0,524	0,546	0,579	1,000

Tabela 8 – Matriz de incidência cinza por semelhança geométrica - dezembro 2012a

	$R_n$	$T_{ar5}$	$UR_{ar5}$	$T_{ar10}$	$UR_{ar10}$	$T_{ar18}$	$UR_{ar18}$	$G$	$T_{solo1}$	$T_{solo3}$	$T_{solo5}$	$T_{solo10}$	$T_{solo20}$	$U_{solo}$
$R_n$	1,000													
$T_{ar5}$	0,670	1,000												
$UR_{ar5}$	0,636	0,146	1,000											
$T_{ar10}$	0,670	0,990	0,143	1,000										
$UR_{ar10}$	0,635	0,144	0,990	0,141	1,000									
$T_{ar18}$	0,670	0,996	0,144	0,994	0,142	1,000								
$UR_{ar18}$	0,635	0,142	0,978	0,140	0,988	0,140	1,000							
$G$	0,695	0,720	0,465	0,719	0,463	0,719	0,460	1,000						
$T_{solo1}$	0,668	0,797	0,104	0,800	0,102	0,794	0,101	0,700	1,000					
$T_{solo3}$	0,667	0,761	0,093	0,761	0,091	0,755	0,090	0,696	0,935	1,000				
$T_{solo5}$	0,667	0,725	0,081	0,725	0,080	0,719	0,079	0,691	0,871	0,922	1,000			
$T_{solo10}$	0,666	0,690	0,069	0,688	0,068	0,683	0,067	0,687	0,806	0,843	0,902	1,000		
$T_{solo20}$	0,665	0,640	0,050	0,637	0,049	0,632	0,049	0,680	0,717	0,735	0,766	0,820	1,000	
$U_{solo}$	0,665	0,604	0,026	0,600	0,025	0,596	0,025	0,674	0,654	0,661	0,676	0,703	0,795	1,000

Tabela 9 – Matriz de incidência cinza por semelhança geométrica - dezembro 2012b

	$R_n$	$T_{ar5}$	$UR_{ar5}$	$T_{ar10}$	$UR_{ar10}$	$T_{ar18}$	$UR_{ar18}$	$G$	$T_{solo1}$	$T_{solo3}$	$T_{solo5}$	$T_{solo10}$	$T_{solo20}$	$U_{solo}$
$R_n$	1,000													
$T_{ar5}$	0,670	1,000												
$UR_{ar5}$	0,636	0,146	1,000											
$T_{ar10}$	0,670	0,990	0,143	1,000										
$UR_{ar10}$	0,635	0,144	0,990	0,141	1,000									
$T_{ar18}$	0,670	0,996	0,144	0,994	0,142	1,000								
$UR_{ar18}$	0,635	0,142	0,978	0,140	0,988	0,140	1,000							
$G$	0,696	0,723	0,474	0,722	0,472	0,722	0,469	1,000						
$T_{solo1}$	0,669	0,954	0,140	0,963	0,138	0,957	0,136	0,718	1,000					
$T_{solo3}$	0,669	0,901	0,128	0,907	0,126	0,902	0,124	0,713	0,946	1,000				
$T_{solo5}$	0,668	0,853	0,116	0,858	0,115	0,852	0,113	0,709	0,899	0,945	1,000			
$T_{solo10}$	0,667	0,750	0,087	0,750	0,086	0,744	0,085	0,698	0,789	0,816	0,850	1,000		
$T_{solo20}$	0,666	0,683	0,064	0,681	0,063	0,676	0,062	0,689	0,716	0,731	0,749	0,834	1,000	
$U_{solo}$	0,666	0,721	0,085	0,721	0,084	0,716	0,082	0,692	0,755	0,777	0,804	0,915	0,938	1,000

Tabela 10 – Matriz de incidência cinza sintética - dezembro 2012a

	$R_n$	$T_{ar5}$	$UR_{ar5}$	$T_{ar10}$	$UR_{ar10}$	$T_{ar18}$	$UR_{ar18}$	$G$	$T_{solo1}$	$T_{solo3}$	$T_{solo5}$	$T_{solo10}$	$T_{solo20}$	$U_{solo}$
$R_n$	1,000													
$T_{ar5}$	0,505	1,000												
$UR_{ar5}$	0,500	0,674	1,000											
$T_{ar10}$	0,505	0,995	0,675	1,000										
$UR_{ar10}$	0,500	0,673	0,994	0,674	1,000									
$T_{ar18}$	0,505	0,998	0,674	0,997	0,673	1,000								
$UR_{ar18}$	0,500	0,672	0,988	0,672	0,994	0,672	1,000							
$G$	0,527	0,550	0,510	0,550	0,510	0,550	0,510	1,000						
$T_{solo1}$	0,503	0,885	0,685	0,888	0,684	0,886	0,683	0,533	1,000					
$T_{solo3}$	0,502	0,861	0,687	0,864	0,686	0,862	0,685	0,530	0,962	1,000				
$T_{solo5}$	0,502	0,837	0,689	0,839	0,688	0,838	0,687	0,526	0,923	0,955	1,000			
$T_{solo10}$	0,502	0,810	0,692	0,812	0,690	0,811	0,689	0,522	0,881	0,906	0,942	1,000		
$T_{solo20}$	0,501	0,770	0,695	0,771	0,694	0,770	0,692	0,516	0,815	0,830	0,851	0,885	1,000	
$U_{solo}$	0,500	0,749	0,687	0,750	0,686	0,750	0,685	0,510	0,775	0,782	0,786	0,794	0,830	1,000

Tabela 11 – Matriz de incidência cinza sintética - dezembro 2012b

	$R_n$	$T_{ar5}$	$UR_{ar5}$	$T_{ar10}$	$UR_{ar10}$	$T_{ar18}$	$UR_{ar18}$	$G$	$T_{solo1}$	$T_{solo3}$	$T_{solo5}$	$T_{solo10}$	$T_{solo20}$	$U_{solo}$
$R_n$	1,000													
$T_{ar5}$	0,505	1,000												
$UR_{ar5}$	0,500	0,674	1,000											
$T_{ar10}$	0,505	0,995	0,675	1,000										
$UR_{ar10}$	0,500	0,673	0,994	0,674	1,000									
$T_{ar18}$	0,505	0,998	0,674	0,997	0,673	1,000								
$UR_{ar18}$	0,500	0,672	0,988	0,672	0,994	0,672	1,000							
$G$	0,527	0,588	0,564	0,588	0,565	0,588	0,565	1,000						
$T_{solo1}$	0,504	0,971	0,679	0,976	0,678	0,973	0,676	0,585	1,000					
$T_{solo3}$	0,504	0,943	0,681	0,947	0,680	0,945	0,679	0,582	0,969	1,000				
$T_{solo5}$	0,503	0,917	0,683	0,921	0,682	0,919	0,681	0,578	0,941	0,969	1,000			
$T_{solo10}$	0,502	0,853	0,688	0,856	0,687	0,855	0,686	0,570	0,872	0,891	0,913	1,000		
$T_{solo20}$	0,502	0,804	0,692	0,806	0,691	0,805	0,690	0,563	0,818	0,832	0,847	0,904	1,000	
$U_{solo}$	0,502	0,825	0,660	0,826	0,659	0,825	0,658	0,558	0,829	0,839	0,851	0,908	0,913	1,000

Durante a análise dos graus de incidência cinza sob diferentes perspectivas, alguns fenômenos físicos ficaram evidenciados. Como mencionado anteriormente, uma ferramenta aplicável e factível deve, necessariamente, ser capaz de identificar estes eventos indicando que existe acordo entre a teoria e o que é observado.

Utilizando os graus de incidência cinza por semelhança geométrica e sintético, pode-se observar o amortecimento típico que caracteriza o perfil de temperatura do solo. Tanto o gicsg quanto o gics apresentam valores decrescentes entre a temperatura do ar (medida a 5 metros) e a temperatura do solo de acordo com o aumento da profundidade (HILLEL, 1998) com os valores de 0,980, 0,873, 0,793, 0,732, 0,677 (tabela 4); 0,914, 0,817, 0,738, 0,670, 0,603 (tabela 6); 0,797, 0,761, 0,725, 0,690, 0,640 (tabela 8); 0,954, 0,901, 0,853, 0,750, 0,683 (tabela 9); 0,885, 0,861, 0,837, 0,810, 0,720 (tabela 10) e 0,971, 0,943, 0,917, 0,853, 0,804 (tabela 11). Entretanto, para os solos arenosos, no período seco, há uma inversão nos graus de incidência, onde os maiores índices aparecem para as profundidades de 3 cm e 5 cm e não para a superfície como observados nos valores 0,882, 0,977, 0,914, 0,749, 0,686 (tabela 5) e 0,907, 0,945, 0,865, 0,694, 0,616 (tabela 7). Isto se deve, provavelmente, ao baixo calor específico dos constituintes superficiais, fazendo com que variações mais abruptas aconteçam. Observa-se na figura 12 a comparação entre a temperatura do ar e a temperatura do solo em diversas profundidades.

Deve-se ainda ressaltar que os graus de incidência tem um significado mais simplista, não podendo ser considerados correlações estatísticas. Sua função é a de fornecer uma classificação da influência mútua entre duas ou mais variáveis, estabelecendo uma relação causal ou de importância entre elas. Altos graus de incidência indicam que efeitos comuns estão ligados à dinâmica de duas ou mais variáveis que compõem um sistema. Estes efeitos se refletem em semelhanças nas velocidades de mudanças nestas séries (gicsint) ou na geometria espacial das mesmas (gicsg). Portanto, usada de maneira correta, os graus de incidência fornecem informações importantes sobre as relações existentes entre as dinâmicas de diversos fatores que constituem um certo sistema, especialmente os de muitas variáveis.

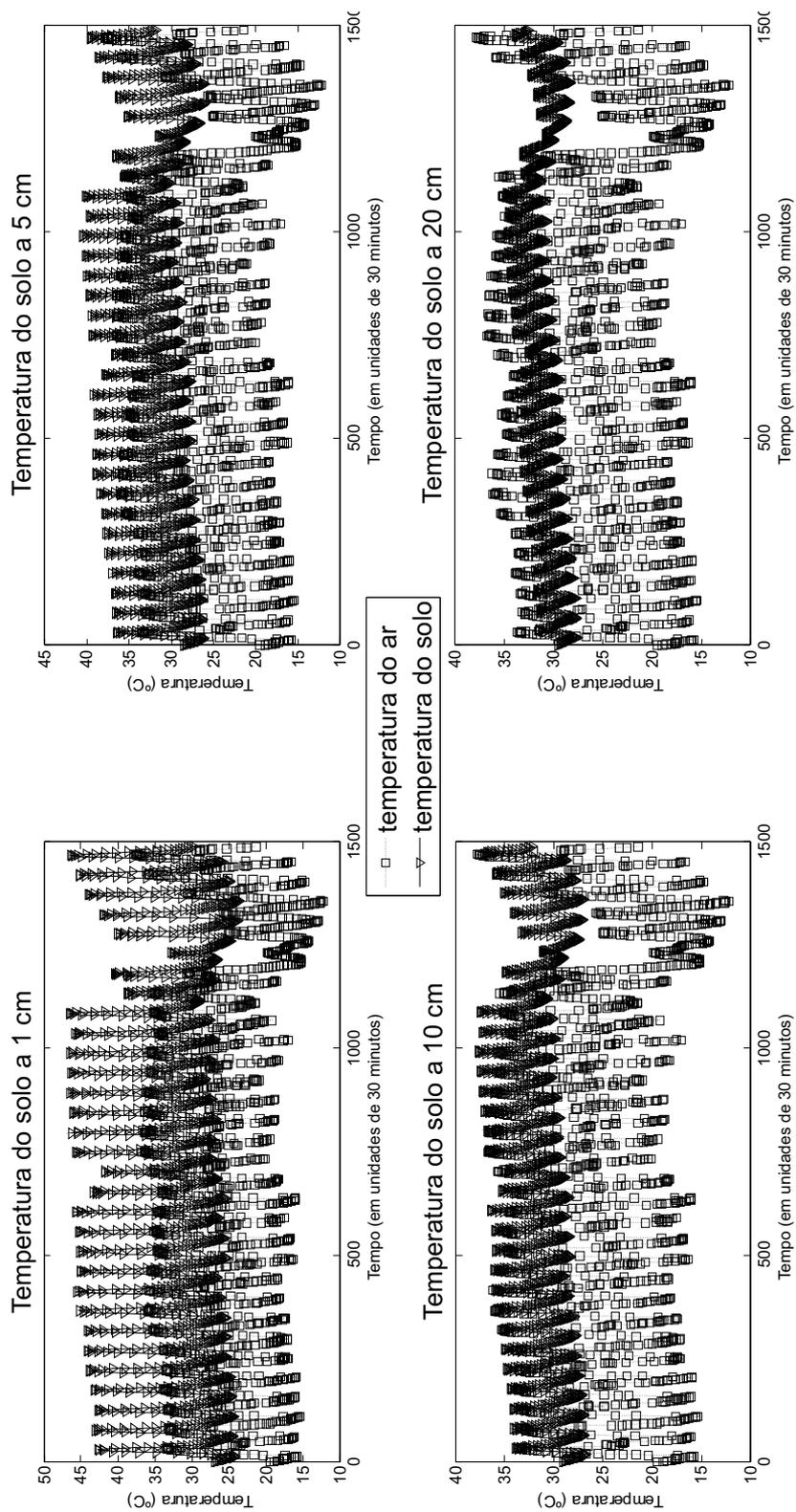


Figura 12 – Comparação entre a temperatura do ar e a temperatura do solo medida as profundidades de 1 cm, 5 cm, 10 cm e 20 cm.

Pode-se destacar também a influência da umidade do solo na temperatura do solo em diferentes profundidades. Observa-se que para o mês de agosto (período de seca), os graus de incidência assumem valores baixos (destaque em azul nas tabelas 4, 5, 6, 7), próximos ao limite inferior para o gics (0.5) e com pouca variação devido a profundidade. Entretanto, para o mês de dezembro (período de chuva), observa-se um aumento relativo nestes índices (destaque em verde nas tabelas 8, 9, 10 e 11) em comparação com o período de seca, além do aumento gradativo da influência da umidade na temperatura para camadas mais profundas do solo. Isto mostra que na ausência de umidade, esta tem pouca influência nas temperaturas para ambos os tipos de solo presentes neste estudo. Entretanto, caso o conteúdo de água se torne presente, este tem papel importante nas variações de temperatura observadas no solo devido a uma influência direta desta umidade no regime de precipitação (KOSTER et al., 2004). Efeito similar ocorre entre a temperatura do ar e umidade relativa do ar, podendo ser observado em todas as tabelas apresentadas anteriormente. Pode-se observar a influência da umidade relativa do solo no perfil de temperatura (13)

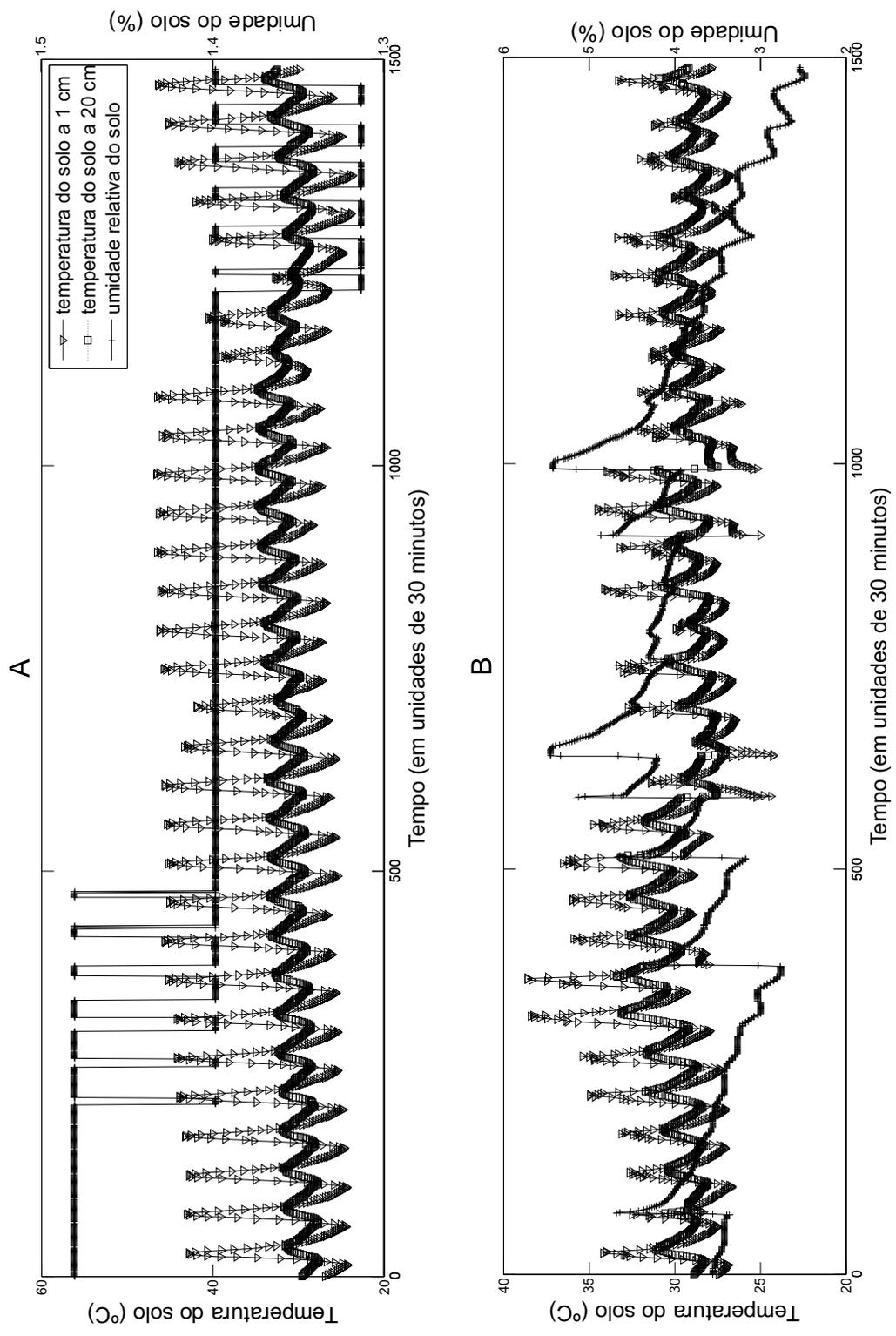


Figura 13 – Comparação entre a temperatura do solo as profundidades de 1 cm e 20 cm e a umidade do solo para o mês de seca (A) e de chuva (B).

É possível ainda agrupar as variáveis presentes neste estudo de acordo com os valores para os graus de incidência e o tipo físico destas. Criou-se então quatro grupos: um para as temperaturas do ar, um para as temperaturas do solo, um para as variáveis ligadas a energia (saldo de radiação e fluxo de calor no solo) e um último para as umidades. Usando a tabela 4, é possível ver que, para o período de seca, as variáveis ligadas a umidade relativa do ar e a umidade do solo tem pouca incidência sobre os outros três grupos, como mencionado anteriormente. Portanto, podemos considerar então que as variáveis que regulam os sistema fazem parte dos três grupos restantes (pelo menos para o período de seca). Considerando ainda o alto grau de incidência cinza por similaridade geométrica presente entre os grupos temperatura do ar e temperatura do solo, as variáveis fundamentais para explicar a dinâmica do sistema podem, neste caso, ser reduzidas para dois grupos (grande grupo de temperaturas e grupo de "energia").

A definição da quantidade mínima de variáveis necessárias para explicar a dinâmica de um sistema já foi objeto de estudo dentro do programa de Física Ambiental (CAPISTRANO, 2007), bem como a aplicação de técnicas de defasagem temporal para análise destes sistemas (CAPISTRANO, 2007; MELLO, 2010; PRADO, 2011). Entretanto, tenta-se aqui a construção do espaço de fases utilizando como seletor de variáveis os graus de incidência cinza por semelhança geométrica. Com base nestes índices, apenas duas variáveis são necessárias, uma do grupo de "energias" e outra do grande grupo de temperatura. Na figura 14 observar-se este espaço de fases com dois pares de variáveis (saldo de radiação e temperatura do ar e saldo de radiação e temperatura do solo) para o período de seca. O surgimento de figuras topológicas definidas, semelhantes à atratores nos dá um indício de que propriedades da dinâmica deste sistema podem, de fato, ser estudadas utilizando-se apenas duas variáveis.

Entretanto, para o período chuvoso (figura 15), tem-se uma desconfiguração deste atrator por meio de uma perturbação inserida no sistema. Portanto, com o aumento do conteúdo de água, tanto no ar quanto no solo, ainda é possível visualizar um padrão resiliente na imagem mas este não se apresenta de forma nítida, indicando que para este período seriam necessárias mais variáveis para se maior conhecimento sobre a dinâmica do sistema, corroborado pelo exposto por Mello (2010), Prado (2011), que indicavam a umidade como uma variável difícil de se modelar, uma vez que a dimensionalidade do espaço de fase aumentava para o período chuvoso. A entrada (aumento) de umidade no sistema faz com que mais variáveis sejam necessárias para uma análise satisfatória das dinâmicas presentes.

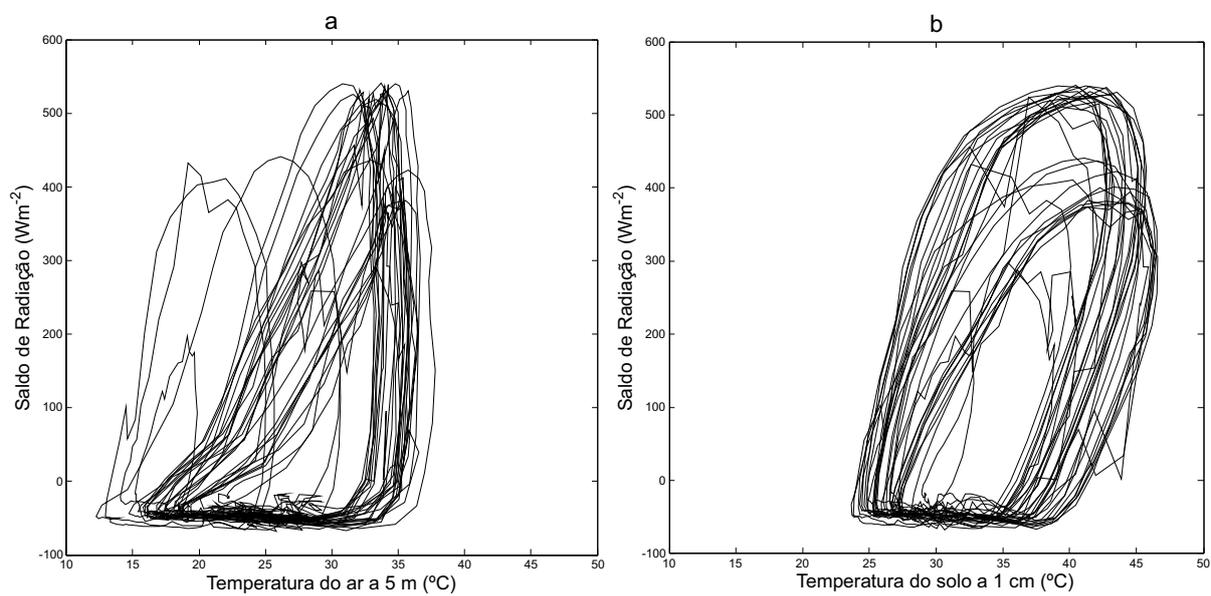


Figura 14 – Espaço de fase construído utilizando o saldo de radiação (t) e temperatura do ar a 5m (t) (a) e saldo de radiação (t) e temperatura do solo a 1cm (t) (b). O período temporal total corresponde a 31 dias do mês de agosto de 2012 e o intervalo entre duas observações sucessivas é de 30 minutos.

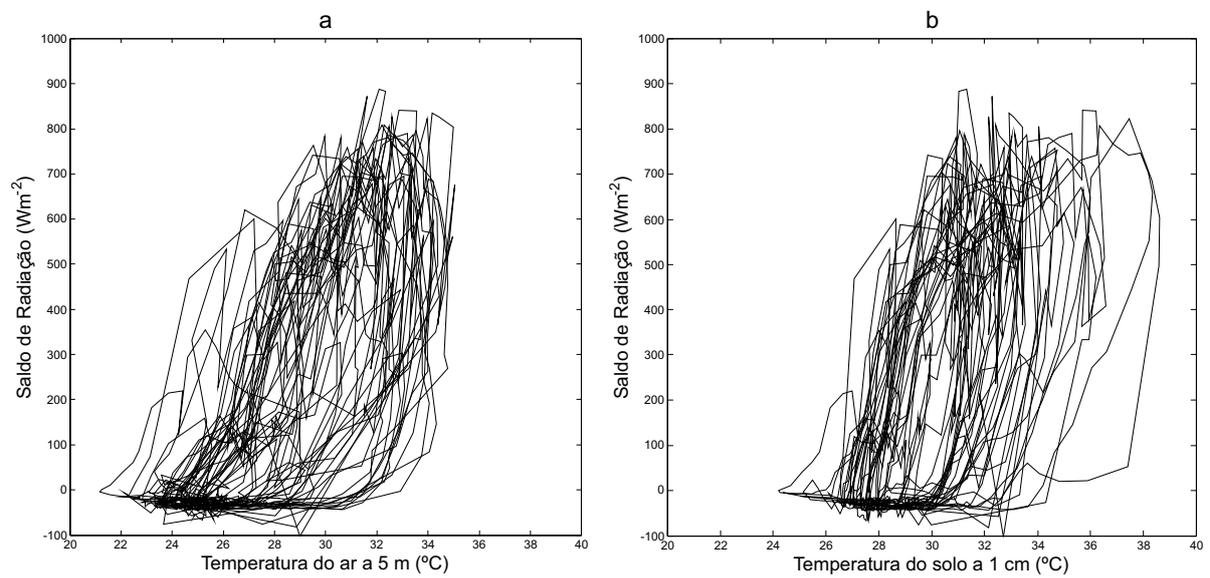


Figura 15 – Espaço de fase construído utilizando o saldo de radiação ( $t$ ) e temperatura do ar a 5m ( $t$ ) (a) e saldo de radiação ( $t$ ) e temperatura do solo a 1cm ( $t$ ) (b). O período temporal total corresponde a 31 dias do mês de dezembro de 2012 e o intervalo entre duas observações sucessivas é de 30 minutos.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A Teoria de Sistemas Cinzas apresentou-se eficiente quando aplicada a solução de problemas em Física Ambiental. Sistemas ambientais constituem objeto de estudo que impõem adversidades às estratégias dos pesquisadores. Fornecer ferramentas capazes de minimizar estas adversidades compreende fronteira decisiva para o avanço de estudos científicos envolvendo estes objetos. Nesta perspectiva, a aplicação da TSC, apresenta resultados satisfatórios em diversas etapas que constituem a análise de dados de micrometeorologia, alcançando o objetivo geral proposto. Além disso, trata-se do primeiro trabalho, utilizando a TSC, para a área de Física Ambiental no Brasil.

O modelo de previsibilidade de primeira ordem para uma variável foi eficiente quando usado no preenchimento de falhas advindas de problemas decorrentes da coleta destes dados. Mesmo o modelo mais simples foi capaz de reconstruir séries temporais com entradas faltantes com precisão média superior a 97%. O processo de janelamento, descrito neste trabalho, aliado a robustez do GM(1,1) apresentam alternativa viável aos métodos conhecidos para preenchimento de falhas. Apesar da não aplicação destes modelos para sua finalidade original, os diversos trabalhos presentes na literatura e o sucesso obtido na reconstrução de séries temporais micrometeorológicas sugerem que estes modelos tem grande aplicabilidade também para a previsão de valores futuros destes dados.

A análise de incidência cinza também apresentou resultados que evidenciam a possibilidade de aplicação desta teoria para a discussão de temas da Física Ambiental. A capacidade da análise aumenta conforme aumenta o número de variáveis, o que fortalece a pesquisa nesta área, uma vez que a implementação de outros sítios de estudo gerarão um volume considerável de informação coletada. Neste trabalho, construiu-se arranjos com quatorze variáveis, possibilitando o estudo da incidência, par a par, identificando na teoria fenômenos observados na prática.

Ainda por meio da análise de incidência, foi possível definir o número mínimo de variáveis que podem ser usadas para construir um espaço de fase onde o estudo da topologia destes espaços pode fornecer informações importantes sobre a dinâmica destes sistemas, sem a necessidade de se conhecer as equações que o regem. Foi visto também que, como trabalhos anteriores indicavam, o período chuvoso ainda imprimi dificuldades extras, uma vez que a presença de água no ar e no solo acoplam mais variáveis, aumentando a complexidade destes arranjos.

Após estes estudos, fica evidenciado que a TSC pode ser usada para analisar sistemas ambientais, o que corrobora com a hipótese de que estes sejam realmente sistemas cinzas, com apenas parte da informação acessível. Pode-se aplicar as ferramentas aqui descritas como recurso único para o estudo destes sistemas, ou fracionada e em conjunto com outras teorias. Um exemplo disto é a metodologia desenvolvida para o preenchimento de falhas, que pode ser usada para preparar dados de entrada para a aplicação de outras teorias sem necessariamente utilizar o restante do procedimento aqui descrito.

Portanto, a inserção de novas abordagens, quando factíveis, correspondem à avanços satisfatórios na compreensão dos objetos de estudo de interesse para as Ciências Ambientais.

## **5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

O estudo aqui iniciado pode ser aprofundado em alguns aspectos. O método de preenchimento de falhas permite otimizações se usados modelos de previsibilidade cinza mais completos, com mais variáveis e diferentes técnicas de clareamento ligadas as equações diferenciais usadas. Pode-se melhorar a reconstrução destas séries temporais ao se utilizar uma "verticalização" nos dados, que consiste em buscar informações para o preenchimento em períodos similares mais distantes (dias, semanas, meses e até anos).

O desenvolvimento de modelos de previsibilidade que agreguem especificidades presentes em problemas da Física Ambiental levaria a um aumento no poder de previsão acerca destes sistemas, permitindo maior controle em diversas etapas do planejamento de setores vitais.

Elaborar outros operadores sequenciais pode fornecer novas abordagens, visto que, especialmente, o operador de geração de acúmulo tem significado físico importante. Pode-se portanto, em teoria, construir operadores para as mais diversas equações existentes na literatura, afim de refinar o processo de estimativa de algumas variáveis.

Neste trabalho, toda a abordagem dos dados coletados foi feita utilizando os números cinzas como números brancos (intervalo igual a zero). Uma proposta viável seria refazer os cálculos aqui apresentados utilizando os intervalos de máximo e mínimos para futuras coletas, aumentando a capacidade de análise da teoria. É possível ainda reescrever parte das equações existentes substituindo os atuais valores exatos por intervalos numéricos.

## REFERÊNCIAS

- AASE, J.; IDSO, S. A comparison of two formula types for calculating long-wave radiation from the atmosphere. *Water Resources Research*, American Geophysical Union, v. 14, n. 4, p. 623–625, 1978. Citado na página 20.
- ARYA, P. S. *Introduction to micrometeorology*. [S.l.]: Academic press, 2001. Citado na página 19.
- BISHT, G.; BRAS, R. L. Estimation of net radiation from the modis data under all sky conditions: Southern great plains case study. *Remote Sensing of Environment*, Elsevier, v. 114, n. 7, p. 1522–1534, 2010. Citado na página 19.
- BISHT, G. et al. Estimation of the net radiation using modis (moderate resolution imaging spectroradiometer) data for clear sky days. *Remote Sensing of Environment*, Elsevier, v. 97, n. 1, p. 52–67, 2005. Citado na página 19.
- CAPISTRANO, V. B. *Análise de Séries Temporais de Variáveis Micrometeorológicas Medidas em Sinop-MT Utilizando a Teoria da Complexidade*. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós Graduação em Física Ambiental, Universidade Federal de Mato Grosso., 2007. Citado na página 42.
- CARRILHO, S. d. P. *Avaliação de modelos para estimativa da radiação de onda longa atmosférica no Cerrado mato-grossense. 2011. 124p*. Tese (Doutorado) — Dissertação (Mestrado)-Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 2011. Citado na página 20.
- CHANG, T.; LIN, S. J. Grey relation analysis of carbon dioxide emissions from industrial production and energy uses in taiwan. *Journal of Environmental Management*, Elsevier, v. 56, n. 4, p. 247–257, 1999. Citado 2 vezes nas páginas 10 e 32.
- CHUAN, L.; BINGPU, C. Application of the grey system model in the development of agriculture economics in gansu. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, v. 34, n. 24, p. 6669, 2006. Citado na página 15.
- DENG, J. L. Control problems of grey systems. *Systems & Control Letters*, Elsevier, v. 1, n. 5, p. 288–294, 1982. Citado 2 vezes nas páginas 4 e 27.
- DENG, J. L. Grey system theory related space. *Fuzzy Mathematics*, v. 4, n. 2, p. 1–10, 1985. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 11.
- DENG, J. L. *Essential topics on grey system: theory and applications*. [S.l.]: China Ocean Press, 1988. Citado 2 vezes nas páginas 4 e 6.
- DENG, J. L. Grey information space. *The Journal of Grey System*, v. 1, n. 1, p. 103–117, 1989. Citado na página 9.

- DENG, J. L. Introduction to grey system theory. *The Journal of grey system*, Sci-Tech Information Services, v. 1, n. 1, p. 1–24, 1989. Citado 3 vezes nas páginas 4, 15 e 16.
- DENG, J. L. Application of grey system theory in china. In: IEEE. *Uncertainty Modeling and Analysis, 1990. Proceedings., First International Symposium on*. [S.l.], 1990. p. 285–291. Citado na página 5.
- DENG, J. L. Grey system theory tutorial. *Huazhong Science and engineering University Press, Wuhan*, 1990. Citado na página 4.
- EMBRAPA-CNPS. *Sistema brasileiro de classificação de solos*. [S.l.]: Brasília: Embrapa-SPI, Rio de Janeiro: Embrapa-Solos, 2006. 306 p. Citado na página 22.
- FALGE, E. et al. Gap filling strategies for defensible annual sums of net ecosystem exchange. *Agricultural and forest meteorology*, Elsevier, v. 107, n. 1, p. 43–69, 2001. Citado na página 27.
- FALGE, E. et al. Gap filling strategies for long term energy flux data sets. *Agricultural and Forest Meteorology*, Elsevier, v. 107, n. 1, p. 71–77, 2001. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 31.
- HAO, Y. et al. Grey system model with time lag and application to simulation of karst spring discharge. *Grey Systems: Theory and Application*, Emerald Group Publishing Limited, v. 1, n. 1, p. 47–56, 2011. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 32.
- HAO, Y. et al. A gray system model for studying the response to climatic change: The liulin karst springs, china. *Journal of Hydrology*, Elsevier, v. 328, n. 3, p. 668–676, 2006. Citado na página 15.
- HILLEL, D. *Environmental soil physics: Fundamentals, applications, and environmental considerations*. [S.l.]: Academic press, 1998. Citado na página 38.
- HUANG, J.; WANG, R.; SHI, Y. Urban climate change: A comprehensive ecological analysis of the thermo-effects of major chinese cities. *Ecological Complexity*, Elsevier, v. 7, n. 2, p. 188–197, 2010. Citado 2 vezes nas páginas 10 e 32.
- HUI, D. et al. Gap-filling missing data in eddy covariance measurements using multiple imputation (mi) for annual estimations. *Agricultural and Forest Meteorology*, Elsevier, v. 121, n. 1, p. 93–111, 2004. Citado na página 27.
- JIANGUO, J. et al. The application of grey system theory to comprehensive evaluation of soybean varieties [j]. *SOYBEAN SCIENCE*, v. 4, 1995. Citado na página 10.
- KAYACAN, E.; KAYNAK, O. Single-step ahead prediction based on the principle of concatenation using grey predictors. *Expert Systems with Applications*, Elsevier, v. 38, n. 8, p. 9499–9505, 2011. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 17.
- KAYACAN, E.; ULUTAS, B.; KAYNAK, O. Grey system theory-based models in time series prediction. *Expert Systems with Applications*, Elsevier, v. 37, n. 2, p. 1784–1789, 2010. Citado na página 17.

KE-PEI, M. et al. Analysis on grey correlation between agricultural input factors and regional gdp growth in anhui province [j]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, v. 24, p. 206, 2010. Citado na página 10.

KOSTER, R. D. et al. Regions of strong coupling between soil moisture and precipitation. *Science*, American Association for the Advancement of Science, v. 305, n. 5687, p. 1138–1140, 2004. Citado na página 40.

KUMAR, U.; JAIN, V. Time series models (grey-markov, grey model with rolling mechanism and singular spectrum analysis) to forecast energy consumption in india. *Energy*, Elsevier, v. 35, n. 4, p. 1709–1716, 2010. Citado na página 17.

LEITÃO, M. Balanço de radiação e energia numa cultura de soja irrigada. *Balanço de radiação e energia numa cultura de soja irrigada*, UFPB Campina Grande ePB, 1989. Citado na página 19.

LI, T. et al. Analysis of relationships between aviation maintenance error modes and their causes based on grey relational analysis method. *Zhongguo Anquan Kexue Xuebao*, Zhongguo Laodong Baohu Kexue Jishu Xuehui Bianji Chubanshu, A 4, Section 9, Hepingli Dongcheng District Beijing 100013 csstlp 63. net, v. 21, n. 2, p. 85–89, 2011. Citado na página 10.

LIAN, R.-J. Enhanced adaptive grey-prediction self-organizing fuzzy sliding-mode controller for robotic systems. *Information Sciences*, Elsevier, 2013. Citado na página 15.

LIN, C.-H. Frequency-domain features for ecg beat discrimination using grey relational analysis-based classifier. *Computers & Mathematics with Applications*, Elsevier, v. 55, n. 4, p. 680–690, 2008. Citado na página 10.

LIN, J.; LIN, C. The use of the orthogonal array with grey relational analysis to optimize the electrical discharge machining process with multiple performance characteristics. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Elsevier, v. 42, n. 2, p. 237–244, 2002. Citado na página 10.

LIN, S. J.; LU, I.; LEWIS, C. Grey relation performance correlations among economics, energy use and carbon dioxide emission in taiwan. *Energy Policy*, Elsevier, v. 35, n. 3, p. 1948–1955, 2007. Citado na página 10.

LIN, Y.; CHEN, M.-Y.; LIU, S. Theory of grey systems: capturing uncertainties of grey information. *Kybernetes*, Emerald Group Publishing Limited, v. 33, n. 2, p. 196–218, 2004. Citado na página 5.

LIU, S.; FANG, Z. Study on algorithm of grey numbers and grey algebraic system. In: IEEE. *Systems, Man and Cybernetics, 2006. SMC'06. IEEE International Conference on*. [S.l.], 2006. v. 3, p. 2272–2276. Citado na página 8.

LIU, S. et al. General grey numbers and their operations. *Grey Systems: Theory and Application*, Emerald Group Publishing Limited, v. 2, n. 3, p. 341–349, 2012. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 8.

LIU, S.; LIN, Y. *Grey information: theory and practical applications*. [S.l.]: Springer New York, 2006. Citado 8 vezes nas páginas 5, 7, 8, 9, 10, 11, 13 e 17.

LIU, S.; LIN, Y. *Grey systems: theory and applications*. [S.l.]: Springer, 2010. Citado 9 vezes nas páginas 6, 7, 8, 9, 10, 11, 13, 15 e 17.

LIU, S. F.; FANG, Z.; FORREST, J. On algorithm rules of interval grey numbers based on the "kernel" and the degree of greyness of grey numbers. In: IEEE. *Systems Man and Cybernetics (SMC), 2010 IEEE International Conference on*. [S.l.], 2010. p. 756–760. Citado na página 8.

LIU, S. f.; FORREST, J. The current developing status on grey system theory. *The Journal of Grey System*, v. 2, 2007. Citado na página 5.

LIU, S.-F.; XIE, N.-M.; FORREST, J. Novel models of grey relational analysis based on visual angle of similarity and nearness. *Grey Systems: Theory and Application*, Emerald Group Publishing Limited, v. 1, n. 1, p. 8–18, 2011. Citado 4 vezes nas páginas 10, 12, 13 e 29.

MELLO, G. J. *Análise de Séries Temporais de Variáveis Micrometeorológicas Medidas em Floresta de Cambarazal no Pantanal Matogrossense Utilizando a Teoria da Complexidade*. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós Graduação em Física Ambiental, Universidade Federal de Mato Grosso., 2010. Citado na página 42.

MOFFAT, A. M. et al. Comprehensive comparison of gap-filling techniques for eddy covariance net carbon fluxes. *Agricultural and Forest Meteorology*, Elsevier, v. 147, n. 3, p. 209–232, 2007. Citado na página 27.

MONTEITH, J.; UNSWORTH, M. *Principles of environmental physics*. [S.l.]: Academic Press, 2007. Citado na página 19.

NG, D. K. W. Grey system and grey relational model. *ACM SIGICE Bulletin*, ACM, v. 20, n. 2, p. 2–9, 1994. Citado na página 10.

PAI, T.-Y. et al. Using grey system theory to evaluate transportation effects on air quality trends in japan. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Elsevier, v. 12, n. 3, p. 158–166, 2007. Citado na página 10.

PRADO, M. F. do. *Modelagem primária da temperatura do ar em uma floresta de transição Amazônia-cerrado no norte de Mato Grosso*. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós Graduação em Física Ambiental, Universidade Federal de Mato Grosso., 2011. Citado na página 42.

PRATA, A. A new long-wave formula for estimating downward clear-sky radiation at the surface. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Wiley Online Library, v. 122, n. 533, p. 1127–1151, 1996. Citado na página 20.

ROSENBERG, N.; BLAD, B.; VERMA, S. *Microclimate; The biological environment 2nd ed.* [S.l.]: Wiley-Interscience, New York, 1983. Citado na página 19.

SAMPAIO, M. *Análise do desempenho térmico e lumínico de habitações populares em Cuiabá-MT*. Tese (Doutorado) — Dissertação de Mestrado. Instituto de Ciências Exatas e da Terra (ICET). Universidade Federal de Mato Grosso. Cuiabá, 2006. Citado na página 22.

SATTERLUND, D. R. An improved equation for estimating long-wave radiation from the atmosphere. *Water Resources Research*, Wiley Online Library, v. 15, n. 6, p. 1649–1650, 1979. Citado na página 20.

SWINBANK, W. C. Long-wave radiation from clear skies. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Wiley Online Library, v. 89, n. 381, p. 339–348, 1963. Citado na página 20.

TSENG, F.-M.; YU, H.-C.; TZENG, G.-H. Applied hybrid grey model to forecast seasonal time series. *Technological Forecasting and Social Change*, Elsevier, v. 67, n. 2, p. 291–302, 2001. Citado na página 27.

WANG, J. et al. Integrated evaluation of distributed triple-generation systems using improved grey incidence approach. *Energy*, Elsevier, v. 33, n. 9, p. 1427–1437, 2008. Citado na página 10.

WANG, W.; HAO, Y.; DU, X. Application of grey system gm (1, n) model to predicting spring flow. In: IEEE. *Grey Systems and Intelligent Services, 2007. GSIS 2007. IEEE International Conference on*. [S.l.], 2007. p. 448–452. Citado na página 15.

WU, L. et al. Grey system model with the fractional order accumulation. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, Elsevier, 2012. Citado na página 15.

YANG, Y. Extended grey numbers and their operations. In: IEEE. *Systems, Man and Cybernetics, 2007. ISIC. IEEE International Conference on*. [S.l.], 2007. p. 2181–2186. Citado na página 8.

YANG, Y.; LIU, S. F. Reliability of operations of grey numbers using kernels. *Grey Systems: Theory and Application*, Emerald Group Publishing Limited, v. 1, n. 1, p. 57–71, 2011. Citado na página 8.

YANG, Y.-W.; CHEN, W.-H.; LU, H.-P. A fuzzy-grey model for non-stationary time series prediction. *Appl. Math*, v. 6, n. 2S, p. 445S–451S, 2012. Citado na página 15.

ZENG, G. et al. Optimization of wastewater treatment alternative selection by hierarchy grey relational analysis. *Journal of environmental management*, Elsevier, v. 82, n. 2, p. 250–259, 2007. Citado na página 10.

ZHANG, J.; WU, D.; OLSON, D. The method of grey related analysis to multiple attribute decision making problems with interval numbers. *Mathematical and computer modelling*, Elsevier, v. 42, n. 9, p. 991–998, 2005. Citado na página 32.

ZHANG, Y.; XU, Y.; WANG, Z. Gm (1, 1) grey prediction of lorenz chaotic system. *Chaos, Solitons & Fractals*, Elsevier, v. 42, n. 2, p. 1003–1009, 2009. Citado na página 15.

## **APÊNDICES**

## APÊNDICE A – CÓDIGOS ESCRITOS EM MATLAB

### A.0.1 Função `investiga.m`

```

1  %-----
2  %Função de investigação dos dados importados, converte vetores coluna ...
   em ve
3  %tores linha. Indica quais são os comandos utilizados para proceder a análi
4  %se de incidência cinza. O arquivo "dados.mat" deve existir antes de rodar
5  %esta função.
6  %-----
7  function investiga(varargin)
8  for vn=1:nargin
9      vari=sprintf('%s',inputname(vn));
10     names.(vari)=[];
11 end
12 varname=fieldnames(names);
13 %Transforma a matriz coluna em uma matriz linha.
14 for i=1:nargin
15     check=size(varargin{i});
16     if (isequal(check(1),1))
17         X=varargin{i};
18     else
19         X=varargin{i}';
20     end
21     dataset.(varname{i})=X;
22     if (find(isnan(varname{i}))==0)
23         sprintf('A série %s possui falhas.',varname{i})
24     else
25     end
26 end
27 sprintf('Se alguma das séries de entrada possuir uma falha, os comandos ...
   gml1(série) e mediaglobal(série) farão o preenchimento.')
28 sprintf('Caso nenhuma séries apresente falhas, use o comando ...
   imagemum(séries) para criar as séries inicilizadas em 1')
29 sprintf('Use o comando imagemzero(séries) para criar as séries ...

```

```
    inicializadas em 0')
30 sprintf('Use o comando imagemzero(séries_inicadas_em_1) para criar ...
    séries inicializadas em 1, depois em 0')
31 sprintf('Use o comando equalizar(séries) para criar séries normalizadas')
32 sprintf('Os comandos gica(séries),gicpe(séries),gicsg(séries) e ...
    gicr(séries) calculam, respetivamente, os graus de incidência cinza ...
    absoluto, de proximidade geométrica, de semelhança geométrica e ...
    relativo.')
33 sprintf('Consulte o texto base para saber qual deve ser a série de ...
    entrada pra cada um dos graus de incidência.')
34 save('dados.mat','-struct','dataset','-append');
35 end
```

## A.0.2 Função mediaglobal.m

```

1 %-----
2 %Função implementando o uso das médias dos vizinhos adjacentes para uma
3 %variável, usado no processo de preenchimento de falhas.
4 %-----
5 function errormat =mediaglobal(data)
6 %Checa se linha ou coluna, entrada deve ser em linha
7 for i=1:nargin
8     check=size(data);
9     if (isequal(check(1),1))
10        else
11            data=data';
12        end
13    end
14 %Cria matriz com as posições das falhas.
15 pfs=find(isnan(data));
16 for findex=1:numel(pfs)
17     wdwdata=zeros(1,11);
18     for jj=1:11
19         wdwdata(jj)=data(pfs(findex)-12+jj);
20     end
21     X0=wdwdata;
22     for kk=1:(numel(X0)-1)
23         alpha(kk)=X0(kk+1)/X0(kk);
24     end
25     alphaglobal=mean(alpha);
26     K(1)=alphaglobal*X0(10);
27     K(2)=alphaglobal*X0(11);
28     data(pfs(findex))=K(2);
29     errormat(findex)=abs((K(1)-wdwdata(11))/wdwdata(11))*100;
30 end
31 end

```

### A.0.3 Função gm11.m

```

1  %-----
2  %Função implementando o modelo de previsão cinza de primeira ordem para uma
3  %variável, usado no processo de preenchimento de falhas.
4  %-----
5  function [erromat,matpreenc]=gm11(data)
6  %Checa se linha ou coluna, entrada deve ser um vetor linha
7  for i=1:nargin
8      check=size(data);
9      if (isequal(check(1),1))
10         else
11             data=data';
12         end
13     end
14 %Cria matriz com as posições das falhas.
15 pfs=find(isnan(data));
16     for findex=1:numel(pfs)
17         wdwdata=zeros(1,11);
18             for jj=1:11
19                 wdwdata(jj)=data(pfs(findex)-12+jj);
20             end
21             T=numel(wdwdata);
22             X0=wdwdata;
23             for i=2:T
24                 X1(1)=X0(1);
25                 X1(i)=X1(i-1)+X0(i);
26             end
27             for i=1:T-1
28                 M(i)=- (0.5*(X1(i)+X1(i+1)));
29             end
30             B=zeros(T-1,2);
31             for i=1:T-1
32                 for j=1:2
33                     if j<2
34                         B(i,j)=M(i);
35                     elseif j>1
36                         B(i,j)=1;
37                     end
38                 end
39             end

```

```
40     for i=2:T
41         Y(i-1)=X0(i);
42     end
43     HCS=inv(B'*B)*B'*Y';
44     H=HCS';
45     for i=2:T+1
46         XR1(i)=(X0(1)-H(2)/H(1))*exp(-1*H(1)*(i-1))+H(2)/H(1);
47     end
48     for i=11:T+1
49         K(i-10)=XR1(i)-XR1(i-1);
50     end
51     m2p(findex)=K(2);
52     relaerror(findex)=abs((K(1)-wdwdata(11))/wdwdata(11))*100;
53     data(pfs(findex))=K(2);
54     end
55     mpp=m2p;
56     erromat=relaerror
57     matpreenc=data;
58 end
```

#### A.0.4 Função equalizar.m

```

1  %-----
2  %Função de inicialização dos dados com processo de "normalização" ou equa_
3  %lização. Cria um das séries que servirá de entrada para análise relacional
4  %cinza. Aceita multiplas séries como argumento. O arquivo "dados.mat" deve
5  %ser criado antes de utilizar está função.
6  %-----
7  function equalizar(varargin)
8  for vn=1:nargin
9      vari=sprintf('%s_eq',inputname(vn));
10     names.(vari)=[];
11 end
12 varname=fieldnames(names);
13 for i=1:nargin
14     check=size(varargin{i});
15     if (isequal(check(1),1))
16         X=varargin{i};
17     else
18         X=varargin{i}';
19     end
20     for q=1: numel(X)
21         dataset.(varname{i})(q)=(X(q))/((1/(numel(X)))*(sum(X)));
22     end
23 end
24 save('dados.mat','-struct','dataset','-append');
25 end

```

### A.0.5 Função imagemzero.m

```
1 %-----
2 %Função de inicialização dos dados com processo de "elemento inicial = 0.
3 %Cria uma das séries que servirá de entrada para análise relacional cinza.
4 %Aceita multiplas séries como argumento. O arquivo "dados.mat" deve ser cri
5 %ado antes de utilizar está função.
6 %-----
7 function imagemzero(varargin)
8 for vn=1:nargin
9     vari=sprintf('%s_iz',inputname(vn));
10    names.(vari)=[];
11 end
12 varname=fieldnames(names);
13 for i=1:nargin
14     check=size(varargin{i});
15     if (isequal(check(1),1))
16         X=varargin{i};
17     else
18         X=varargin{i}';
19     end
20     for q=1: numel(X)
21         dataset.(varname{i})(q)=(X(q)-X(1));
22     end
23 end
24 save('dados.mat','-struct','dataset','-append');
25 end
```

## A.0.6 Função `imagemum.m`

```

1  %-----
2  %Função de inicialização dos dados com processo de "elemento inicial = 1.
3  %Cria uma das séries que servirá de entrada para análise relacional cinza.
4  %Aceita multiplas séries como argumento. O arquivo "dados.mat" deve ser cri
5  %ado antes de utilizar está função.
6  %-----
7  function imagemum(varargin)
8  for vn=1:nargin
9      vari=sprintf('%s_iu',inputname(vn));
10     names.(vari)=[];
11 end
12 varname=fieldnames(names);
13 for i=1:nargin
14     check=size(varargin{i});
15     if (isequal(check(1),1))
16         X=varargin{i};
17     else
18         X=varargin{i}';
19     end
20     if (X(1)==0)
21         sprintf('Série %s com inicio em zero, não é possível calcular ...
22             sua imagem 1',inputname(i))
23         dataset.(varname{i})=[];
24     else
25         for q=1: numel(X)
26             dataset.(varname{i})(q)=(X(q)/X(1));
27         end
28     end
29 save('dados.mat','-struct','dataset','-append');
30 end

```

### A.0.7 Função gica.m

```

1  %-----
2  %Função que calcula o grau de incidência cinza absoluto.
3  %A entrada deve ser necessariamente uma série, ou séries, inicializada em
4  %zero.
5  %-----
6  function gicamatrix=gica(varargin)
7  gicamatrix=zeros(nargin);
8  for i=1:nargin
9      if (isequal(length(varargin{1}),length(varargin{i})))
10     else
11         sprintf('Uma das entradas não obedece o principio de tamanhos ...
12             iguais para todas as séries.')
```

```

12     end
13 end
14 clear i
15 for i=1:nargin
16     X1=varargin{i};%Inicializa o primeiro elemento do par de séries ...
17         para comparação.
18     %calcula de |s1|
19     l=numel(X1);
20     s1mod=abs(sum(X1(2:(l-1)))+(0.5)*(X1(1)));
21     for j=1:nargin
22         X2=varargin{j};%Inicializa o segundo elemento do par de ...
23             séries para comparação.
24         %Calcula-se |s1|,|s2| e |s1-s2|
25         s2mod=abs(sum(X2(2:(l-1)))+(0.5)*(X2(1)));
26         X1X2=X1-X2;
27         s1s2mod=abs(sum(X1X2(2:(l-1)))-(0.5)*(X1X2(1)));
28         gicamatrix(i,j)=(1+s1mod+s2mod)/(1+s1mod+s2mod+s1s2mod);
29     end
30 end
31 end

```

### A.0.8 Função gicr.m

```

1  %-----
2  %Função que calcula o grau de incidência cinza relativo.
3  %A entrada deve ser necessariamente uma série, ou séries, inicializada em
4  %um e depois em zero.
5  %-----
6  function gicrmatrix=gicr(varargin)
7  gicrmatrix=zeros(nargin);
8  for i=1:nargin
9      if (isequal(numel(varargin{1}),numel(varargin{i})))
10     else
11         sprintf('Uma das entradas não obedece o principio de tamanhos ...
12             iguais para todas as séries.')
```

### A.0.9 Função gicpe.m

```

1  %-----
2  %Função que calcula o grau de incidência cinza por proximidade espacial.
3  %A entrada deve ser necessariamente uma série, ou séries, inicializada em
4  %um.
5  %-----
6  function gicpematrx=gicpe(varargin)
7  gicpematrx=zeros(nargin);
8  for i=1:nargin
9      if (isequal(length(varargin{1}),length(varargin{i})))
10     else
11         sprintf('Uma das entradas não obedece o principio de tamanhos ...
12             iguais para todas as séries.')
```

### A.0.10 Função gicsg.m

```

1  %-----
2  %Função que calcula o grau de incidência cinza por semelhança geométrica.
3  %A entrada deve ser necessariamente uma série, ou séries, inicializada em
4  %zero.
5  %-----
6  function gicsgmatrix=gicsg(varargin)
7  gicsgmatrix=zeros(nargin);
8  for i=1:nargin
9      if (isequal(length(varargin{1}),length(varargin{i})))
10     else
11         sprintf('Uma das entradas não obedece o principio de tamanhos ...
12             iguais para todas as séries.')
```

12 end

13 end

14 clear i

15 for i=1:nargin

16 X1=varargin{i};%Inicializa o primeiro elemento do par de séries ...  
para comparação.

17 l=numel(X1);

18 for j=1:nargin

19 X2=varargin{j};%Inicializa o segundo elemento do par de ...  
séries para comparação.

20 %Calcula |s1-s2|

21 X1X2=X1-X2;

22 s1s2mod=abs(sum(X1X2(2:(l-1)))-(0.5)\*(X1X2(1)));

23 gicsgmatrix(i,j)=(1+numel(X1)\*abs(max(X1,X2)))/((1+numel(X1)...  
24 \*abs(max(X1,X2)))+s1s2mod);

25 end

26 end

27 end