

*Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária  
Embrapa Informática Agropecuária  
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento*

# Fundamentos de Sistemas de **INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS**

4ª edição revista e atualizada

*José Iguelmar Miranda*

**Embrapa**  
*Brasília, DF*  
2015

Exemplares desta publicação podem ser adquiridos na:

**Embrapa Informática Agropecuária**  
Av. André Tosello, no 209, Barão Geraldo  
Caixa Postal 6041  
CEP 13083-886 Campinas, SP  
Fone: (19) 3211-5700  
Fax: (19) 3211-5754  
www.embrapa.br  
<https://www.embrapa.br/fale-conosco/sac/>

**Unidade responsável pelo conteúdo**  
Embrapa Informática Agropecuária

**Comitê Local de Publicações**

Presidente  
*Giampaolo Queiroz Pellegrino*

Secretária-executiva  
*Carla Cristiane Osawa*

Membros:  
*Adhemar Zerlotini Neto, Stanley Robson de Medeiros Oliveira,  
Thiago Teixeira Santos, Maria Goretti Gurgel Praxedes,  
Adriana Farah Gonzalez, Neide Makiko Furukawa,  
Carla Cristiane Osawa*

**Embrapa Informação Tecnológica**

Parque Estação Biológica (PqEB) - Av. W3 Norte (final)  
CEP 70770-901 Brasília, DF  
Fone: (61) 3448-4236  
Fax: (61) 3448-2494  
www.embrapa.br/livraria  
livraria@embrapa.br

Coordenação editorial: *Selma Lúcia Lira Beltrão  
Lucilene Maria de Andrade  
Nilda Maria Cunha Sette*

Supervisão editorial: *Juliana Meireles Fortaleza*

Revisão de texto: *Maria Cristina Ramos Jubé*

Revisão e reestruturação de índice e bibliografia  
*Cecília Maria MacDowell*

Projeto gráfico, diagramação e tratamentos de imagens:  
*Júlio César da Silva Delfino*

**1ª edição**

1ª impressão (2005): 1.000 exemplares

**2ª edição**

1ª impressão (2010): 1.000 exemplares

**3ª edição (2014):** Ebook

**4ª edição**

1ª impressão (2015): 1.000 exemplares

**Todos os direitos reservados**

A reprodução não autorizada desta publicação, no todo ou em parte,  
constitui violação dos direitos autorais (Lei nº 9.610).

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)**

Embrapa Informação Tecnológica

Miranda, José Iguelmar.

Fundamentos de Sistemas de Informações Geográficas / José Iguelmar Miranda. – 4. ed. rev. e atual. – Brasília, DF : Embrapa, 2015.  
399 p. ; il. color. ; 21 cm x 27 cm.

ISBN 978-85-7383-484-6

1. Análise de dados. 2. Cartografia. 3. Ciência da informação. 4. Geografia. I. Embrapa Informática Agropecuária. II. Título.

CDD 658.05

© Embrapa 2015

## **Autor**

**José Iguelmar Miranda**

Matemático, doutor em geoprocessamento e pesquisador aposentado da Embrapa Informática Agropecuária

## **Agradecimentos**

O autor agradece a todos que trabalharam na revisão de textos, confecção de figuras, editoração e publicação do livro.

A Embrapa, que tem investido na minha formação profissional e oferecido condições de trabalho para a realização desta obra.

A todos, meu muito obrigado.

## Apresentação

Nos dias de hoje, a tecnologia de informação e comunicação (TIC) se tornou a base do desenvolvimento da sociedade moderna. Não é mais possível viver sem internet e sistemas de apoio à decisão rápidos e eficientes, baseados em tecnologias inovadoras, como as Geotecnologias, que abarcam, entre outros conhecimentos, o sensoriamento remoto orbital, as técnicas de geoprocessamento, os sistemas de informações geográficas (SIG), os WebGIS, os bancos de dados georreferenciados e os sistemas de posicionamento global (GPS).

Os sistemas de informações geográficas (SIG) contemplam, especificamente, um conjunto de programas computacionais que permitem armazenar, integrar, recuperar e analisar dados espaciais que podem ser visualizados no formato de mapas. Esses sistemas possuem um amplo espectro de aplicação em vários setores da economia. A moderna agricultura, visando ao desenvolvimento rural sustentável, não poderia ficar alheia a esse importante avanço tecnológico. Por isso, cada vez mais, utiliza os SIG para subsidiar o mapeamento sistemático da agricultura em todo o território nacional, dando suporte aos modelos de dinâmica do uso e da cobertura das terras, ao monitoramento das alterações da cobertura vegetal natural, às questões relacionadas à segurança alimentar, aos modelos espaciais relacionados às mudanças climáticas globais e às emissões de gases de efeito estufa, à garantia da produção de fontes alternativas para a geração de bioenergia, e à estruturação de sistemas e mecanismos de seguro para a remuneração da atividade agrícola.

Neste livro, o autor aborda, de maneira didática, os conceitos fundamentais de SIG, os principais equipamentos de entrada e saída utilizados na área, os modelos e as estruturas de dados espaciais, principais algoritmos para análise de dados espaciais, bem como coloca à disposição, na web, esses dados e mapas.

Nesta quarta edição, o autor também compartilha, com todos os profissionais que trabalham com algum tipo de informação espacial, seus conhecimentos sobre o uso de gerenciadores de banco de dados espaciais, como uma extensão dos gerenciadores de dados tradicionais e o uso de servidores web para o manejo de mapas, de forma interativa ou estática. O autor também destaca, com muita propriedade, o potencial de linguagens de programação como uma ferramenta adicional para o manejo de dados espaciais, com uma referência especial à linguagem R e sua utilização com a biblioteca de gerência de dados espaciais.

*Silvia Maria Fonseca Silveira Massruhá*  
Chefe-Geral da Embrapa Informática Agropecuária

## Prefácio

Atualmente é indiscutível a importância dos Sistemas de Informações Geográficas (SIG) para auxiliar na compreensão e gestão do espaço terrestre. Mais do que armazenar, recuperar, visualizar e imprimir dados espaciais num sistema de projeção geográfica, o SIG tem a capacidade de efetuar análise e modelagem espacial. Essas características fazem com que, mais do que uma tecnologia, os SIGs possam ser considerados como uma ciência de informação espacial.

Pode-se dizer que a disseminação, popularização e evolução dos SIGs se confundem com a própria evolução dos microcomputadores, mas mais precisamente isso ocorreu no Brasil a partir dos anos 1990. O que era inimaginável realizar-se 20 anos atrás hoje se tornou corriqueiro nas instituições de ensino, pesquisa, gerenciamento e gestão. Acrescenta-se ainda a grande utilização pelas empresas de telecomunicações, eletricidade, água, esgoto e concessionárias de estradas, que se apropriaram desse conhecimento e que hoje é indispensável para o planejamento de suas atividades.

Em vista do seu caráter multidisciplinar, os SIGs podem ser utilizados amplamente por pessoas de diversas formações para diversas finalidades, cujas aplicações variam das mais simples, como construir o perímetro de uma propriedade, analisar sobreposição de mapas e encontrar o melhor caminho entre dois pontos, até análises mais complexas, como construção de cenários – extremamente importantes na área de planejamento.

Num sistema composto de máquinas, softwares e pessoal, este último – que considero a peça mais fundamental do sistema – com certeza será o maior beneficiário deste livro, agora em sua quarta edição. Escrito de forma clara e com ótimos exemplos ilustrativos, pode ser utilizado tanto por iniciantes como por pessoas mais experientes no uso dos SIGs. Um livro dessa natureza, além de disseminar e facilitar o conhecimento, traduz o esmero do colega José Iguelmar Miranda, que soube colocar à disposição da comunidade acadêmica a sua experiência acumulada ao longo de uma vida dedicada à pesquisa.

*João dos Santos Vila da Silva*  
Pesquisador  
Embrapa Informática Agropecuária

## **Prefácio à primeira edição**

A tecnologia de sistemas de informação geográfica está tendo um crescimento substancial no Brasil. De um tema restrito ao meio acadêmico e a alguns órgãos públicos no início dos anos 90, as geotecnologias representam hoje um segmento destacado das aplicações da informática no Brasil, cujos clientes incluem concessionárias de serviços de redes de telefonia, água e energia, prefeituras, empresas e instituições da área ambiental, estudos censitários e de políticas públicas. Além disso, registra-se a sua presença em setores de pesquisa acadêmica em Saúde, Ciências da Terra, Transporte, Ecologia, Demografia, Economia, Informática e Geografia.

Com um público-alvo tão heterogêneo, escrever um livro introdutório sobre sistemas de informação geográfica é desafio substancial. A seleção dos temas a incluir (e a omitir) e da melhor forma de expor os argumentos requer grande sensibilidade e uma combinação do saber acadêmico com experiência em projetos reais. Este amálgama de competências está muito presente em José Iguelmar Miranda, cuja trajetória combina projetos de aplicação em diferentes centros da Embrapa, com um doutorado na Clark University, um dos mais destacados centros de pesquisa em geotecnologias do mundo.

Ao organizar este livro, o autor foi extremamente cuidadoso em apresentar, com didática exemplar, as diferentes partes constitutivas de um sistema de informação geográfica: estruturas de dados espaciais, equipamentos de entrada e saída, sistemas GPS, projeções cartográficas, interpolação e álgebra de mapas. Em cada tema, é palpável seu cuidado em dialogar com o leitor, respeitando sua perspectiva e buscando levá-lo até um nível de conhecimento em que possa compreender toda a riqueza e o potencial das geotecnologias.

As dimensões amazônicas do Brasil trazem um desafio extraordinário para a gestão de nosso território, que só será vencido se conseguirmos, coletivamente, apropriarmo-nos das geotecnologias mais recentes e colocá-las a serviço da sociedade brasileira. Desta forma, o lançamento de um livro em português sobre o tema, ainda mais escrito com honestidade, cuidado e conhecimento, é motivo de orgulho e satisfação para todos os que trabalham na área. Que o autor se encoraje a escrever outros livros, pois, em termos de conhecimento, mais é sempre melhor.

*Gilberto Câmara*  
São José dos Campos

## Sumário

<b>Capítulo 1. 0 que é um sistema de informações geográficas</b> .....	19
<b>1.1 Definindo um Sistema de Informações Geográficas</b> .....	20
1.1.1 Introdução.....	20
1.1.2 Um breve histórico da evolução do SIG.....	20
1.1.3 Definições e controvérsias.....	22
1.1.4 O SIG como disciplina e seu potencial.....	27
<b>1.2 Componentes Básicos do Sistema de Informação Geográfica</b> .....	31
1.2.1 Componentes de informática.....	31
1.2.2 Módulos de programas de aplicação.....	32
1.2.3 Recursos humanos.....	38
<b>Capítulo 2. Equipamentos usados para entrada e saída de dados</b> .....	43
<b>2.1 Equipamentos de Entrada</b> .....	44
2.1.1 Introdução.....	44
2.1.2 A mesa digitalizadora.....	45
2.1.3 Rastreadores óticos (scanners).....	52
<b>2.2 Equipamentos de Saída</b> .....	59
2.2.1 Introdução.....	59
2.2.2 Monitores.....	60
2.2.3 Impressoras.....	63
2.2.4 Traçadores gráficos ( <i>plotters</i> ).....	65
<b>2.3 Como Montar um Ambiente SIG</b> .....	67
2.3.1 Equipamentos e programas.....	68
2.3.2 Como montar a base de dados no ambiente SIG.....	69
<b>Capítulo 3. Sistemas de referência</b> .....	73
<b>3.1 Introdução</b> .....	74
<b>3.2 Sistema de Coordenadas Planas</b> .....	74
<b>3.3 O Sistema de Referência Espacial de Latitude-Longitude</b> .....	76
<b>3.4 Sistemas de Projeções de Mapas</b> .....	78
<b>3.5 A Projeção Universal Transversa de Mercator (UTM)</b> .....	85
<b>3.6 Sistemas de Referência Específicos</b> .....	88
3.6.1 Mercator Web.....	90
3.6.2 Identificador de referência espacial.....	90
<b>3.7 Necessidades do SIG em Relação a um Sistema de Referência</b> .....	91
<b>3.8 Sistema de Posicionamento Global (<i>Global Positioning System – GPS</i>)</b> .....	93
<b>3.9 Uso de Escalas</b> .....	98
<b>3.10 O SIG e o Uso de Mapas</b> .....	103
<b>3.11 Um Modelo Conceitual de SIG</b> .....	104
<b>Capítulo 4. Modelos de dados</b> .....	107
<b>4.1 Introdução</b> .....	108
<b>4.2 Pontos, Linhas e Áreas</b> .....	112
<b>4.3 Modelos de Representação Espacial</b> .....	115

4.3.1	Introdução .....	115
4.3.2	Modelo de dado matricial .....	116
4.3.3	Modelo vetorial .....	122
4.3.4	Comparando os modelos matricial e vetorial .....	128
<b>Capítulo 5. Estruturas de dados espaciais .....</b>		<b>131</b>
5.1	<b>Introdução .....</b>	<b>132</b>
5.2	<b>Estruturas de Dados para Modelos Matriciais .....</b>	<b>132</b>
5.2.1	Introdução .....	132
5.2.2	Estruturas matriciais .....	133
5.3	<b>Estruturas de Dados para Modelos Vetoriais .....</b>	<b>143</b>
5.3.1	Introdução .....	143
5.3.2	Estrutura <i>spaghetti</i> .....	144
5.3.3	Estrutura topológica .....	148
5.4	<b>Conversão entre os Modelos Matricial e Vetorial .....</b>	<b>152</b>
5.5	<b>Representação de Superfícies .....</b>	<b>154</b>
5.5.1	Estrutura de grade regular .....	155
5.5.2	Estrutura vetorial .....	156
5.6	<b>Qualidade de Dados e Erros .....</b>	<b>160</b>
5.6.1	Erros que são independentes do processamento do SIG (erros extrínsecos) .....	163
5.6.2	Erros introduzidos no processamento de dados do SIG (erros intrínsecos) .....	164
5.6.3	Erros nos métodos usados para coletar dados (erros extrínsecos) .....	165
5.6.4	Exatidão e precisão .....	167
<b>Capítulo 6. Funções fundamentais de análise .....</b>		<b>169</b>
6.1	<b>Introdução .....</b>	<b>170</b>
6.2	<b>Reclassificação .....</b>	<b>173</b>
6.2.1	Reclassificação no ambiente matricial .....	173
6.2.2	Reclassificação no ambiente vetorial .....	175
6.3	<b>Operações Pontuais .....</b>	<b>180</b>
6.3.1	Introdução .....	180
6.3.2	Operação de sobreposição .....	182
6.4	<b>Álgebra de Mapas e Modelagem Cartográfica .....</b>	<b>193</b>
6.4.1	Tipos de modelos cartográficos .....	196
6.4.2	Modelagem indutiva e dedutiva .....	197
6.4.3	Fluxograma do modelo .....	198
6.4.4	Considerações sobre os modelos .....	200
<b>Capítulo 7. Operações de vizinhança .....</b>		<b>203</b>
7.1	<b>Introdução .....</b>	<b>204</b>
7.2	<b>Operações Espaciais .....</b>	<b>204</b>
7.3	<b>Funções de Vizinhança .....</b>	<b>207</b>
7.3.1	Proximidade .....	207
7.3.2	Dilatação .....	213
7.3.3	Funções de espalhamento .....	217
7.3.4	Funções de visibilidade .....	222
7.3.5	Análise de rede .....	223

<b>7.4 Filtros</b> .....	227
7.4.1 Filtros de passa-baixa ou de suavização .....	232
7.4.2 Filtros de passa-alta para detecção de bordas .....	234
7.4.3 Filtros direcionais.....	237
<b>Capítulo 8. Interpolação</b> .....	241
<b>8.1 Estatística Clássica e Espacial</b> .....	242
<b>8.2 O que é Interpolação</b> .....	242
<b>8.3 Rede Amostral Densa e Esparsa</b> .....	246
<b>8.4 Superfícies Representadas</b> .....	246
<b>8.5 Coleta de Dados</b> .....	247
<b>8.6 Transformação Ponto – Área</b> .....	248
<b>8.7 Estimativa de Ponto</b> .....	248
8.7.1 Polígonos .....	251
8.7.2 Triangulação.....	254
8.7.3 Média da amostra local .....	258
8.7.4 O método do inverso da distância .....	258
<b>8.8 Método de Krige</b> .....	261
<b>8.9 Modelo Numérico de Terreno (MNT)</b> .....	268
<b>8.10 A Rede Triangular Irregular (<i>Triangulated Irregular Network – TIN</i>)</b> .....	273
<b>8.11 Vizinhaça do Ponto Estimado</b> .....	274
<b>8.12 Missão Topográfica Radar da Shuttle (SRTM)</b> .....	277
<b>Capítulo 9. Avanços na análise espacial</b> .....	281
<b>9.1 Introdução</b> .....	282
<b>9.2 Combinação Linear Ponderada</b> .....	283
<b>9.3 A Lógica Difusa</b> .....	284
<b>9.4 Análise Multicritério</b> .....	289
<b>9.5 Modelos de Probabilidade Bayesiana</b> .....	297
9.5.1 Teoria bayesiana .....	297
9.5.2 Pesos de evidência .....	306
9.5.3 Teoria de Dempster-Shafer .....	309
<b>Capítulo 10. Saídas</b> .....	317
<b>10.1 Introdução</b> .....	318
<b>10.2 Mapa Temático</b> .....	318
<b>10.3 Visualizando o Mapa Temático</b> .....	319
<b>10.4 Desenhando o Mapa Temático</b> .....	321
<b>10.5 Papel dos Símbolos no Mapa Temático</b> .....	326
<b>10.6 Princípios de Desenho Gráfico</b> .....	330
<b>Capítulo 11. Sistemas de informações geográficas e a Web</b> .....	337
<b>11.1 Introdução</b> .....	338
<b>11.2 Breve Histórico da Internet</b> .....	340
<b>11.3 Arquitetura da Aplicação</b> .....	341
11.3.1 Definir o objetivo da página .....	341
11.3.2 Modelo do servidor de mapas .....	342

11.3.3 Interação com um banco de dados .....	348
<b>11.4 Condições Atuais de Mapas na Web</b> .....	351
<b>11.5 Servidores de Mapas Disponíveis na Web</b> .....	358
11.5.1 Servidores de mapas proprietários .....	358
11.5.2 <i>Thread</i> : comunicação cliente-servidor.....	358
11.5.3 Servidores de mapas livres .....	360
11.5.4 Visualizadores de mapas .....	368
11.5.5 Instalação do servidor de mapas.....	369
11.5.6 Mapas na Web: estáticos e dinâmicos.....	369
11.5.7 Mapas na Web: em busca de um padrão.....	370
<b>11.6 Google Earth</b> .....	371
11.6.1 Introdução.....	371
11.6.2 Keyhole Markup Language (KLM) .....	372
11.6.3 Google Earth .....	373
<b>11.7 SIG de Acesso Livre</b> .....	374
11.7.1 Introdução .....	374
11.7.2 Software de código aberto .....	374
11.7.3 Bibliotecas compartilhadas em C.....	375
11.7.4 Aplicações em C .....	375
11.7.5 Bibliotecas compartilhadas em Java .....	376
11.7.6 Aplicações em Java .....	377
<b>Referências</b> .....	379
<b>Índice</b> .....	397

Capítulo

1

---

# O que é um sistema de informações geográficas

## 1.1 Definindo um sistema de informações geográficas

### 1.1.1 Introdução

O conceito de um sistema de informações geográficas (SIG) evoluiu nos últimos anos. Seu objetivo não mudou, mas, observando as definições a seguir, nota-se que o contexto da definição foi mudado à medida que o uso destes sistemas evoluiu abrangendo diferentes campos de pesquisa. Burrough (1986), como muitos outros naquela década, definia SIG como um sistema (automatizado) de coleta, armazenamento, manipulação e saída de dados cartográficos. Esta definição tem grande influência de uma linguagem comum, quase jargão, da área de computação. Isto pode levar o leitor a pensar que um SIG só passou a existir com o advento do computador.

Tais sistemas já existiam bem antes do aparecimento do computador e do consequente desenvolvimento de sistemas computacionais. Os SIGs evoluíram a partir de séculos de produções de mapas e da compilação de registros geográficos. Os romanos foram os primeiros a empregar o conceito de registro de propriedades, no capitum registra – registro da terra. E em muitos países o termo cadastro designa o registro de mapas e propriedades (BERNHARDSEN, 1999).

A evolução do conceito de SIG se relaciona com as diferentes áreas de pesquisa que contribuíram para o seu desenvolvimento como informática, que enfatiza a ferramenta banco de dados ou linguagem de programação; geografia, que o relacionam a mapas, e outros que ainda enfatizam aplicações como suporte à decisão. Nos próximos itens um breve histórico da evolução de SIG, suas definições e consequentes contradições e, por último, o surgimento do SIG como uma nova disciplina, vista como uma verdadeira ciência da informação, e seu potencial ainda não totalmente exaurido.

### 1.1.2 Um breve histórico da evolução do SIG

Na década de 80 houve um crescente interesse na manipulação da informação geográfica por computador. A informação geográfica se relaciona a locais específicos, possuindo um sistema de referência ou localização espacial através de um sistema de coordenadas. Este processo resultou no desenvolvimento e evolução de sistemas que ficaram conhecidos como SIG. Enfatiza-se que o uso das informações na forma digital (legível por computador) não representa fato novo, mas o uso do termo no dia-a-dia desenvolveu-se naquela década. O SIG não evoluiu de forma isolada, mas do esforço conjunto de outras tecnologias e áreas de aplicação. A tecnologia de SIG representa uma convergência entre diferentes disciplinas que têm a localização geográfica como seu objeto de estudo (MARTIN, 1996).

Fica difícil precisar a origem do termo e possíveis datas iniciais de trabalhos com SIG. Sabe-se que SIG é um fenômeno recente, considerando-se o tempo de existência das disciplinas envolvidas. Há 30 anos acumula-se um razoável índice de teorias, tecnologias e desenvolvimento organizacional no campo de SIG, culminando em um período de intensa atividade na década de 90 (MAGUIRE, 1991). A recente origem e o progresso acelerado não têm ajudado na análise e definição do que seja um SIG.

Por que a dificuldade em definir datas iniciais no caso de SIG? Em grande parte porque as pessoas envolvidas com seu desenvolvimento inicial (pessoal de apoio de companhias comerciais