

# ESTUDO DE LOCALIZAÇÃO DE CENTRAIS TERMOELÉTRICAS SOLARES DE GRANDE PORTE NO SEMI-ÁRIDO NORDESTINO - FUNDAMENTOS E METODOLOGIA

**Verônica Wilma Bezerra Azevedo** – veronica.bezerra@navteq.com

**Chigueru Tiba** – tiba@ufpe.br

Universidade Federal de Pernambuco, Departamento de Energia Nuclear

**Ana Lúcia Bezerra Candeias** – analucia@ufpe.br

Universidade Federal de Pernambuco, Departamento de Engenharia Cartográfica

**Resumo.** Com a crescente preocupação de gerar energia elétrica a partir de fontes renováveis, a geração heliotérmica de eletricidade ganha repercussão em vários países do mundo, como na Espanha, Portugal e Alemanha. No Brasil, esta forma de geração de energia, em projetos de grande porte (acima de 80MW), ainda não é explorada. Entretanto, sabe-se que o país dispõe de extensas áreas com disponibilidade de irradiação direta normal (um dos principais parâmetros para a implantação de centrais solares) no Nordeste do Brasil, sobretudo na região do Semi-Árido, a qual apresenta também, outras características importantes para a instalação destas centrais, tais como: ótimas condições topográficas, baixa velocidade de ventos, baixa densidade populacional e disponibilidade de terras que não são usadas para a agricultura, por exemplo. Ademais, a introdução de centrais solares na região proporcionará a vários benefícios locais como o crescimento e o desenvolvimento de uma dada região, a implementação de benefícios sociais e a geração de emprego e renda. Por meio de um Sistema de Informações Geográficas (SIG) todas as características importantes na localização de uma central solar são representadas na forma de dados espaciais e, quando modeladas, permite indicar os locais aptos a instalação destas centrais. O SIG é constituído por um conjunto de recursos especializados que permite manipular dados espaciais, proporcionando rapidez e eficiência na identificação de lugares apropriados a implantação de centrais solares ao mesmo tempo em que estabelece cenários futuros ao planejamento energético, com seus respectivos impactos, custos e benefícios. Este artigo mostra os fundamentos teóricos para a localização ótima de centrais termoeletricas no Semi-Árido Nordeste Brasileiro na escala de 1:10.000.000. As ferramentas de SIG são apresentadas e a localização será definida com diferentes planos de informação que são importantes, como: solo, irradiação solar direta normal (valor médio anual), água, topografia do terreno, etc. A álgebra de mapas dos planos de informação será usados para definir os locais aptos a instalação.

**Palavras-chave:** Energia Solar, Central Termoeletrica Solar, Sistema de Informações Geográficas.

## 1. INTRODUÇÃO

A geração de eletricidade por processos heliotérmicos tem se difundido bastante nos últimos anos e apresenta como principal experiência as usinas SEGS (Solar Electric Generation Systems), localizadas na Califórnia e mais recentemente na Espanha. De fato, as SEGS, ou genericamente os concentradores lineares parabólicos, representam um importante empreendimento comercial de sistemas termo-solares para produção de energia elétrica. As usinas são de natureza híbrida (25% de produção anual representada por gás natural) e tem demonstrado a viabilidade técnica dos concentradores de foco linear na geração de eletricidade e na natureza despachável da energia produzida. De acordo com Rolim *et al.* (2009), as SEGS são capazes de despachar energia elétrica com uma eficiência de pico de 24%, que é a maior entre as diversas tecnologias solares comerciais disponíveis da atualidade.

No Brasil, a produção heliotérmica de eletricidade não é explorada. Por outro lado, sabe-se que o país dispõe de extensas áreas com disponibilidade de irradiação solar direta normal, sobretudo na região do Semi-Árido Nordeste. Esta região apresenta ainda outras características favoráveis a instalação das centrais solares, tais como: ótimas condições topográficas, baixa velocidade de ventos, baixos índices pluviométricos e baixas variações de temperatura em um dia. Todas estas características, quando modeladas por um Sistema de Informações Geográficas (SIG) permitem indicar os locais aptos à instalação de centrais termoeletricas solares em uma dada região.

Ademais, a repercussão técnica e econômica da introdução das centrais solares na Matriz Energética Brasileira poderá ser muito grande uma vez que se espera a difusão ampla desta tecnologia dentro de um horizonte de 10 anos no Brasil e no Mundo. Alguns países como a Espanha, Portugal, e a Alemanha já estão investindo na utilização de energia solar para produção de eletricidade. Somente na Espanha, vários projetos estão em fase de andamento. Entre eles, está a construção da torre central PS20 (20MW) e várias usinas do tipo SEGS como, por exemplo, a Andasol I e II (50MW cada). Assim, diante desta situação, seria vantajoso ao sistema elétrico brasileiro viabilizar mecanismos de geração de eletricidade a partir de fontes renováveis na região, realizar Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) e avaliar detalhadamente o potencial do recurso solar disponível.

## 2. CENTRAL TERMOELÉTRICA SOLAR SEGS

### 2.1 Concentração de energia solar para produção de eletricidade

Em uma central termoeétrica solar a produção de eletricidade é feita a partir da conversão da energia térmica em energia mecânica a altas temperaturas. Para atingir tais temperaturas, os sistemas necessitam de materiais compatíveis e do uso de um fluido térmico. Outro aspecto indispensável é a redução das perdas de energia nos coletores solares.

Os coletores solares apresentam um balanço de energia, onde o ganho é determinado pela irradiação solar absorvida. Por outro lado, as perdas são determinadas pela geometria e pelo material que compõem o coletor e a superfície absorvedora, bem como pela temperatura desta última. Para reduzir as perdas de energia é usado o artifício de reduzir a superfície da região absorvedora em relação à superfície de abertura do coletor. A relação entre ambas é denominada concentração do coletor. Verifica-se que quanto mais elevada é a concentração do coletor, mais elevada será a temperatura alcançada pela superfície absorvedora. Para (Rabl, 1985) os coletores onde a trajetória dos raios pode ser descrita em duas dimensões (2D, coletores cilíndricos) a máxima concentração é dada por Eq.1:

$$C = \frac{1}{\sin \theta} \quad (1)$$

Onde:  $\theta$  é a abertura angular dos raios provenientes do sol.

Quando a trajetória dos raios solares pode ser descrita em três dimensões (3D, discos parabólicos) a máxima concentração que pode ser atingida é igual a Eq.2:

$$C = \frac{1}{\sin^2 \theta} \quad (2)$$

O ângulo  $\theta$  é o semi-ângulo de aceitação e descreve uma faixa angular (secção cônica em 2D ou cone em 3D) onde todos os raios são aceitos pelo coletor de forma estática. A Figura 1 ilustra o ângulo para os coletores 2D.

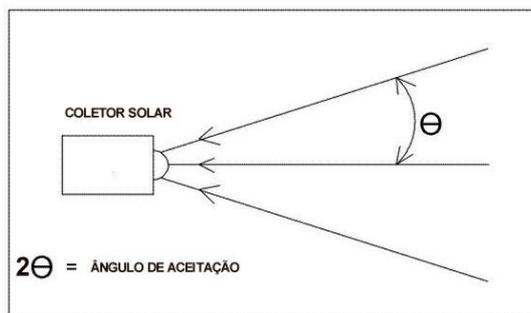


Figura 1- Ângulo de aceitação para os coletores 2D.

No primeiro caso, os valores máximos teóricos alcançados foram da ordem de 200 e, no segundo caso, da ordem de 40.000 (Rabl, 1985). Assim, para obter temperaturas intermediárias, até 500°C, são usados os concentradores cilíndricos (2D). Para atingir temperaturas maiores, usam-se as torres de potência e os discos parabólicos.

### 2.2 Central solar termoeétrica SEGS

As usinas SEGS (*Solar Electric Generation Systems*) constituem o maior e o mais bem sucedido exemplo de central termoeétrica solar a partir do uso de concentradores cilíndricos parabólicos. As nove usinas SEGS foram construídas em três diferentes locais do deserto de Mojave, na Califórnia (EUA), entre 1984 e 1991, e estão em operação atualmente, demonstrando a viabilidade técnica dos concentradores cilíndrico parabólicos na geração de eletricidade e na natureza despachável da energia produzida.

O campo de coletores lineares das SEGS tem como componente básico o sistema de captação SCA (*Solar Collector Assembly*) que são espelhos de vidro curvados formando uma cavidade cilíndrica parabólica onde a irradiação solar direta normal é focalizada. Os SCA das SEGS são dispostos em colunas paralelas e foram desenvolvidos pela empresa *Luz International* em três gerações de SCA: (a) LS-1, usado nas SEGS I e em parte das SEGS II; (b) LS-2, usado nas usinas SEGS II, III e IV; e (c) LS-3, usado nas SEGS VII, VIII e IX. (Rolim, 2007). As principais características destas usinas são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Principais características das usinas SEGS.

SEGS	Ano	Potência (MW)	Campo Solar (Área em m <sup>2</sup> )	Saída Anual (MWh)	Localização
I	1984	13,8	82.960	30.100	Daggett
II	1986	30	190.338	80.500	
III e V	1987	30	230.300	92.780	Kramer Junction
V	1988	30	250.500	91.820	
VI	1989	30	188.000	90.850	
VII	1989	30	194.280	92.646	
VIII	1990	80	464.340	252.750	Harper Lake
IX	1991	80	483.960	252.125	

Cada SCA é composto por um coletor parabólico independente, estrutura metálica de suporte, tubos receptores e sistema de rastreamento solar. Os coletores são alinhados sobre o eixo norte-sul, o que possibilita o rastreamento solar segundo o eixo leste-oeste, assegurando que o Sol esteja continuamente focalizado no tubo absorvedor.

O sistema de rastreamento solar dispõe de um equipamento sensor preciso para alinhar o SCA com o Sol. Este rastreamento é controlado um computador processador principal, o FSC (Field Supervisory Controller) que monitora também a temperatura do tubo absorvedor HCE (Heat Collection Element). Para acompanhar o Sol de leste para oeste, o eixo de orientação pode ser colocado de duas maneiras: (a) paralelo à linha norte-sul; e (b) paralelo ao eixo de rotação da Terra (Eixo polar). Já para acompanhamento do sol em seu movimento norte-sul, o eixo de giro é colocado paralelo à linha leste-oeste (Solar Trough, 2008).

O espelho parabólico reflete a irradiação solar direta normal para o tubo absorvedor (HCE). Este tubo, mostrado na Figura 2, é um dos principais motivos para a alta eficiência dos coletores LS-3. O HCE é constituído por um tubo de aço inoxidável, recoberto com uma superfície seletiva e envolvida por um tubo de vidro, o que proporciona a redução de perdas térmicas. Getters (esponja química) absorvem gases como o hidrogênio que permeiam as paredes do vidro e do aço inoxidável, dentro do espaço evacuado. (Solar Trough, 2008).

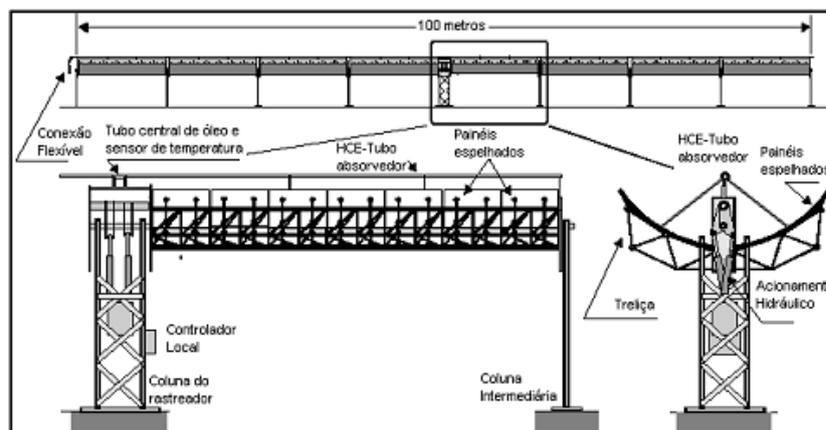


Figura 2- Estrutura longitudinal e transversal de um coletor LS-3 das SEGS.

Fonte: Solar Trough (2008)

O suprimento de energia primária nas SEGS é obtido a partir da hibridização com gás natural. Segundo Price (1999) em uma base anual tem-se que 75% ou mais da energia é primária (recurso solar), e os 25% restantes é de gás natural. Uma opção alternativa é o armazenamento térmico que tem como vantagem o aumento do fator de capacidade da usina solar sem o uso de um sistema de reserva, mas seu uso proporciona um aumento do campo solar da usina.

No campo de coletores da usina circula um fluido de transferência de calor (óleo com temperaturas da ordem de 400°C) que é aquecido e bombeado através de uma série de trocadores de calor, onde é gerado vapor superaquecido. O fluido, então, retorna ao sistema. O vapor gerado aciona um conjunto convencional turbina-gerador para produzir energia elétrica. O vapor usado pela turbina é depois condensado e retorna aos trocadores de calor para ser transformado novamente em vapor, repetindo o ciclo.

O sistema de armazenamento térmico bem como os equipamentos boiler e o aquecedor para o fluido para a operação híbrida da usina a partir do uso do gás natural, são opcionais. (Solar Trough, 2008). Apenas na SEGS I foi implantado um sistema de armazenamento térmico (2-TANKHTF) visando melhorar o fator de capacidade da usina solar. Tais sistemas não foram incorporados nas usinas SEGS posteriores.

Nos projetos desenvolvidos a partir da SEGS II, o calor é transportado para o bloco de potência a partir do uso de um fluido sintético (óxido de bifenil-difenil) como modo de transferência de calor. Este fluido passa pelo sistema trocador de calor para produzir vapor superaquecido, operando somente com energia solar. (Pilkington, 1996 apud Rolim, 2007). A Figura 3 mostra um diagrama das configurações típicas de usinas do tipo SEGS.

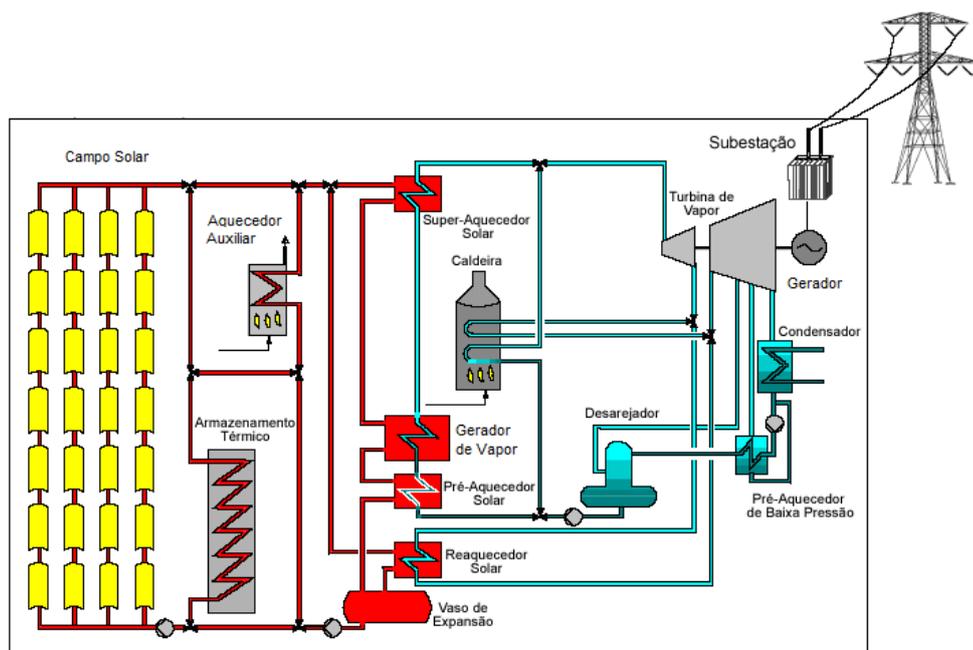


Figura 3- Configuração típica de usinas tipo SEGS. Fonte: Solar Trough (2008)

Atualmente, as nove usinas SEGS estão em operação na Califórnia, no modo híbrido, vendendo energia para a rede elétrica. De acordo com Rolim *et al.* (2009) as unidades SEGS são capazes de despachar energia elétrica com uma eficiência de pico de 24%, que é a maior entre as diversas tecnologias solares comerciais disponíveis.

### 3. SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS

De acordo com (Burrough e McDonnell, 1998) um Sistema de Informações Geográficas (SIG) se caracteriza como um conjunto de tecnologias implementadas em ambiente computacional que é capaz de manipular, armazenar e recuperar dados objetivando simular, a partir de simplificações, situações e contextos existentes no mundo real. Um SIG permite ainda a visualização simultânea de diferentes camadas de dados.

Todo SIG deve atender as seguintes funcionalidades (Câmara *et al.* 1996 apud Cunha, 2006): (1) Entrada de dados gráficos e descritivos; (2) Armazenagem e gerenciamento dos dados; (3) Interação com o usuário; (4) Elaboração de análises dos dados; (5) Saída e apresentação de informações.

A entrada de dados gráficos e descritivos é um aspecto importante, e seleciona os planos de informação (unidades básicas de armazenamento de dados geográficos) a serem usados na aplicação em SIG. Quando esta etapa é realizada sem o conhecimento dos fundamentos cartográficos pode criar inconsistências cartográficas, decorrentes da conversão entre as plataformas CAD e SIG, por exemplo, da sobreposição de planos de informação em escalas incompatíveis, do uso de documentos oriundos de distintos Sistemas Geodésicos de Referência, entre outros.

O armazenamento e o gerenciamento dos dados são tratados pelo Sistema Gerenciador de Banco de Dados (SGBD) que deve facilitar a entrada, a saída e a recuperação dos dados espaciais, controlando e restringindo o acesso. A interação com o usuário permite o contato com as funcionalidades do SIG. Esta interação deve ser de fácil interpretação, uma vez que as dificuldades advindas da mesma é uma das causas de desuso de sistemas.

A análise dos dados é feita tanto na base gráfica, a partir das análises espaciais, quanto na descritiva por meio do uso de operações aritméticas e de Lógica Booleana, permitindo a geração de relatórios, gráficos, mapas entre outros. A saída de informações pode ser realizada de forma temporária ou definitiva. A primeira se dá quando a informação é apresentada no monitor ou armazenada em mídia magnética. Quando impressa (mídia analógica) tem-se a saída definitiva. A Figura 4 apresenta as funcionalidades do SIG.



Figura 4 – Estrutura básica dos Sistemas de Informação Geográfica.  
Fonte: (Cunha, 2006 apud Câmara *et al.* 1996)

### 3.1 Dados espaciais em SIG

Os dados espaciais em SIG são compostos pelos dados gráficos e dados descritivos. Os primeiros são responsáveis pelo registro gráfico, que possui uma localização definida no mundo real, podendo ser armazenados e representados pelos formatos de arquivo vetorial e matricial (raster). A estrutura vetorial prevê a ocorrência de três entidades espaciais distintas representadas nas primitivas geográficas: ponto, linha e polígono. Já a estrutura matricial (raster) é uma estrutura numérica representada por imagens armazenadas em formato matricial. A matriz é composta por um conjunto de pixels (células) disposto em linhas (x) e colunas (y). As posições da matriz (x, y) definem as coordenadas da imagem e apresentam um nível de cinza associado.

Os dados descritivos são estruturados por listas seqüenciais (registros) ou arquivos indexados e compreendem os atributos que descrevem as entidades destes objetos. Os dados descritivos qualificam os dados gráficos por meio dos atributos e são, em geral, armazenados em estruturas tabulares dos Bancos de Dados e controlados pelo Sistema Gerenciador de Banco de Dados (SGBD).

Os dados espaciais possuem quatro características indissociáveis, a saber, (Burrough e McDonnell, 1998): (1) Uma posição geográfica; (2) Atributos associados; (3) Relações topológicas; (4) Uma referência temporal.

A posição geográfica responde à questão “onde está?” e tem por objetivo identificar, univocamente, uma dada entidade geográfica tomando-se por base um sistema de referência definido. (Tomlin, 1990). O atributo é a componente do dado espacial que tem por finalidade descrever e caracterizar a feição gráfica, respondendo a questão do tipo: “o que é? do que se trata?” As relações topológicas que descreve as relações espaciais do objeto com seu entorno. Estas relações topológicas se fundamentam na teoria dos conjuntos. A referência temporal esclarece a questão de “quando é o dado?” sendo essencial para avaliar o comportamento do dado ao longo do tempo.

As aplicações de SIG tratam com dois grandes tipos de dados espaciais: (a) Geo-campos: usados para representar grandezas distribuídas espacialmente, tais como tipo de solo, topografia e teor de minerais. (b) Objetos geográficos: que são individualizáveis e têm identificação. Os objetos geográficos (ou geo-objetos) têm atributos não espaciais, armazenados em um banco de dados, podendo estar associado a várias representações gráficas como as escolas, municípios e fazendas.

### 3.2 Análises espaciais em SIG e álgebra de campos

O objetivo da análise espacial é mensurar propriedades e relacionamentos considerando a localização espacial do fenômeno em estudo (Goodchild e Haining, 2004). Um dos principais tipos de análise espacial é a álgebra de campos

A álgebra de campos (também chamada de álgebra de mapas) consiste de um conjunto de procedimentos de análise espacial em SIG que produz novos dados, a partir de funções de manipulação aplicadas a estes. Os elementos da álgebra de campos operam sobre mapas, associando cada local de uma determinada área de estudo a um valor quantitativo ou qualitativo. Os mapas são tratados como variáveis individuais, e as operações definidas sobre estas variáveis são aplicadas de forma homogênea a todos os pontos do mapa. De acordo com Barbosa *et al.* (1997) estas operações podem ser agrupadas em três grandes classes: pontuais, vizinhança e zonais.

As operações pontuais resultam em geo-campos, numérico ou temático, cujos valores são função dos valores associados ao mesmo local por uma ou mais representações de outros geo-campos. Estas operações operam sobre mapas (fatiar um Modelo Numérico de Terreno, por exemplo) ou sobre conjuntos espaciais (operações booleanas, por exemplo), podendo ser do tipo matemáticas ou de transformações (ponderação, fatiamento, entre outros).

As operações de vizinhança atuam sobre um geo-campo influenciado pela dimensão e forma da vizinhança (máscara). Durante a operação a máscara se desloca, aplicando ao geo-campo os valores do atributo delimitados pela máscara. No ambiente computacional, o formato de máscara mais usado é o de uma matriz de células. A Filtragem espacial de geo-campos usando representação imagem e cálculo de declividades a partir de um geo-campo de altimetria são exemplos de operações de vizinhança que usam máscara no formato matriz de células. (Barbosa, 1997).

Nas operações zonais em álgebra de campos, o valor de cada posição geográfica do geo-campo destino depende do valor do atributo em todas as posições geográficas que compõem a região no geo-campo origem. Diferente das transformações de vizinhança, onde cada posição geográfica possui sua própria vizinhança representada por uma máscara que se desloca sobre os dados, nas transformações zonais as regiões são estáticas e não se deslocam sobre a região geográfica de estudo. Exemplos de operações zonais são as operações de maioria zonal e as de diversidade zonal.

### 3.3 SIG e energias renováveis

A utilização de SIG em fontes renováveis de energia teve início nos anos 90 e para Tiba *et al.* (2008) suas aplicações podem ser agrupadas em: (1) SIG como recurso de suporte a decisão para integração de energia renováveis em grande escala e em nível regional; (2) SIG para avaliação de geração distribuída e conectada à rede elétrica; (3) SIG para sistema de produção descentralizada e autônoma de eletricidade.

Exemplos do uso do SIG no suporte a integração de energia renováveis em grande escala e ao nível regional são a avaliação do potencial das energias renováveis (solar, eólica, biomassa e pequenas hidráulicas), sua participação em relação à energia primária regional e a redução de emissões de CO<sub>2</sub> (Bourges, 1996 apud Tiba *et al.* 2008). Para a geração distribuída e conectada à rede elétrica, pode-se citar a localização de centrais eólicas, segundo o potencial de ventos, as infra-estruturas de acesso e as linhas de transmissão.

Uma das principais aplicações de SIG para eletrificação rural (produção autônoma e descentralizada de eletricidade) foi o SOLARGIS. Este aplicativo baseado em SIG teve por objetivo relacionar cenários de eletrificação rural em algumas localidades (isoladas ou não), a partir de usuários individuais ou conectados a uma mini-rede local. A residência isolada poderia ser eletrificada com sistemas fotovoltaicos, eólico, gerador a gasolina, grupo diesel ou interligada a rede.

## 4. METODOLOGIA DA PESQUISA

### 4.1 Procedimentos metodológicos

Os procedimentos metodológicos apontam diretrizes para o estudo de localização de centrais solares estão mostrados na figura 5.

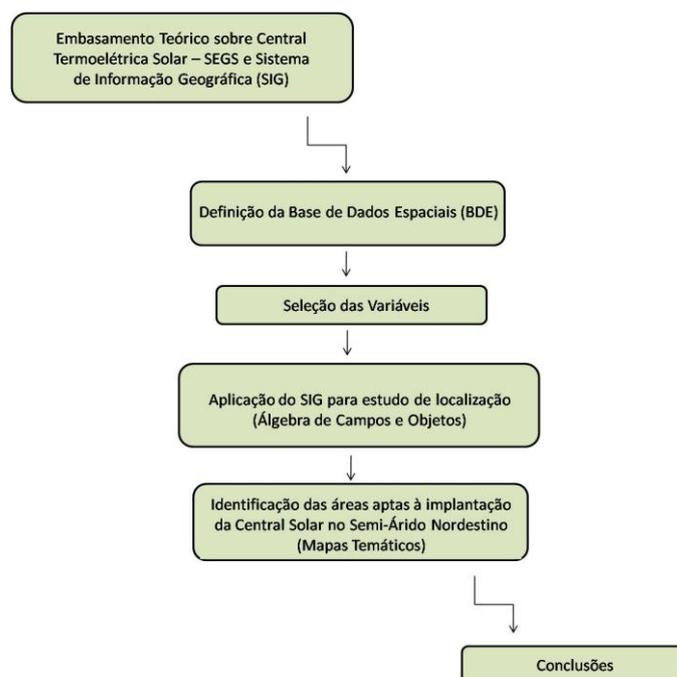


Figura 5 – Procedimentos metodológicos.

## 4.2 Recursos utilizados

Os recursos utilizados para a realização desta pesquisa serão: (a) Um computador Pentium 4 – 2.80 GHz, 1.0 GB RAM; (b) Software ArcGIS versão 9x (ESRI), (c) Arquivos vetoriais do tipo shapefile (.shp) referentes aos planos de informação; (d) Imagens do sensor ativo SRTM (Shuttle Radar Topography Mission).

## 4.3 O Semi-Árido Nordestino

Segundo a ASA (2009) o Semi-Árido Nordestino compreende os estados de Pernambuco, Paraíba, Alagoas, Sergipe, Bahia, Piauí, Ceará e Rio Grande do Norte, ocupando 86,48% da área de todo o Semi-Árido Brasileiro. Trata-se de uma área onde o regime pluvial é irregular, com média anual que varia entre 400 e 800mm. O clima predominante é quente e seco, com temperatura média anual de 27°C e baixas amplitudes térmicas (da ordem de 2-3°C). Sua vegetação é do tipo floresta tropical decídua (caatinga), que se desenvolve sobre um complexo mosaico de solos, resistindo a longos períodos de estiagem.

De acordo com Cavalcanti e Petti (2008) o valor diário médio anual da irradiação solar direta normal na região é da ordem de 6,0 kWh/m<sup>2</sup>. Os ventos possuem uma velocidade média de aproximadamente 8 m/s (24 km/h). A figura 6 ilustra a localização do Semi-Árido Nordestino.

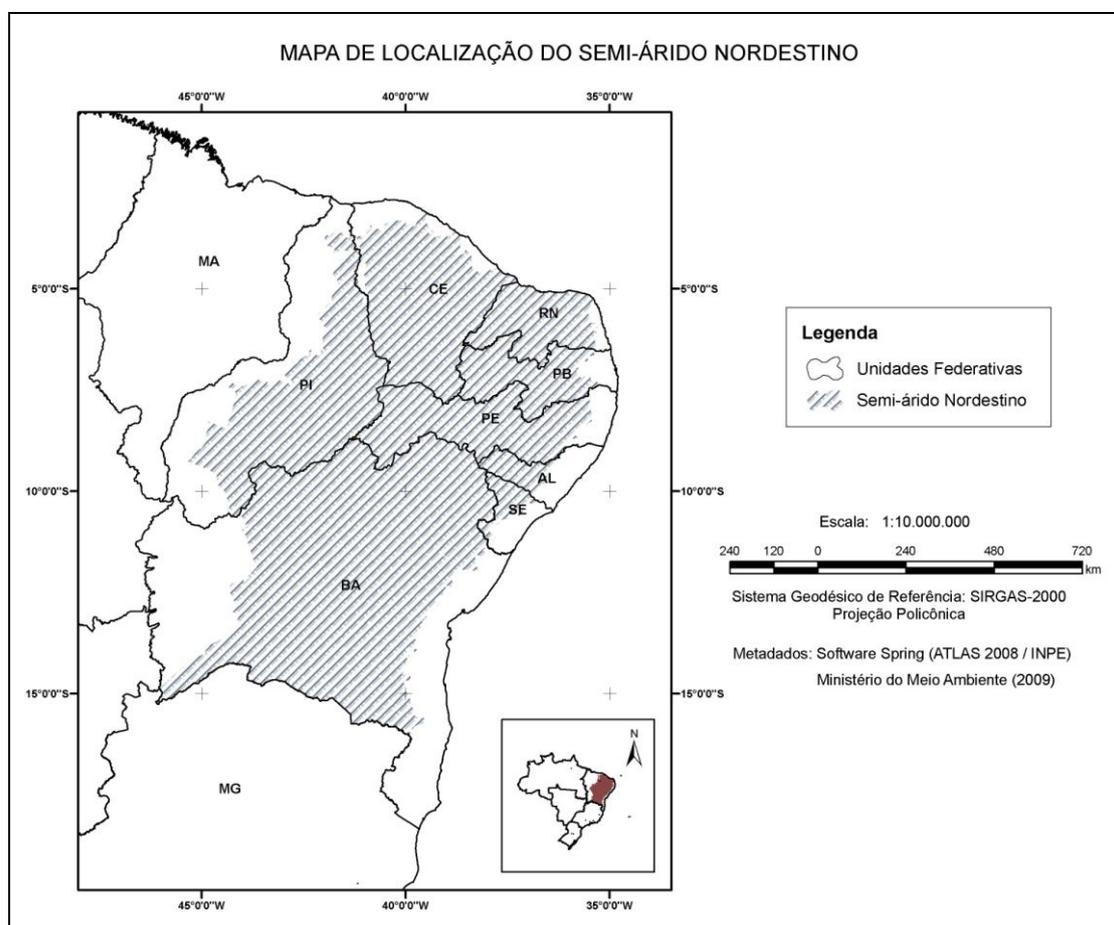


Figura 6 – Mapa de localização da área de estudo

## 4.4 Definição da base de dados espaciais

O estudo de localização de centrais termoeletricas solares dessa pesquisa considera uma central solar tipo SEGS (80 a 100 MW), interligada a rede de energia elétrica, para a região do Semi-Árido Nordestino (estados de Pernambuco, Paraíba, Alagoas, Sergipe, Bahia, Piauí, Ceará e Rio Grande do Norte). Esse estudo requer o conhecimento dos seguintes Planos de Informação (PI): uso e ocupação do solo, recurso solar, suprimento de água, topografia do terreno, conexão com a rede elétrica, disponibilidade de combustível para backup e acesso. Os PI indicados para avaliar a viabilidade de implantação de centrais solares no Semi-Árido Nordestino foram selecionados pela sua relevância no processo de definição de áreas aptas à implantação.

Para definir a Base de Dados Espaciais (BDE), os planos de informação (PI) devem ser gerenciados de modo a evitar as inconsistências cartográficas decorrentes da conversão entre as plataformas CAD e SIG, da sobreposição de planos de informação em escalas compatíveis e do uso de documentos oriundos de Sistemas Geodésicos de Referência (SGR) distintos, por exemplo.

No Brasil, o SGR SIRGAS2000 constitui o Sistema Oficial para o Sistema Geodésico Brasileiro (SGB) e para o Sistema Cartográfico Nacional (SCN). Desta forma, os PI devem ser georreferenciados a este SGR. Após o georreferenciamento deve-se determinar uma escala de trabalho compatível para a apresentação dos dados bem como um sistema de projeção para os mesmos.

#### 4.4.1 Uso e ocupação do solo

Na implantação de uma central solar devem ser consideradas as permissões e as restrições quanto à utilização do solo. As permissões referem-se às questões de relação contratual estabelecida entre os proprietários da terra e os desenvolvedores do projeto, ao passo que as restrições referem-se à utilidade destinada ao solo.

Com relação às restrições, verifica-se que áreas protegidas por legislação (unidades de conservação ambiental – proteção integral e uso sustentável, os territórios indígenas, os territórios quilombolas e as reservas de Mata Atlântica, por exemplo) não são consideradas áreas aptas para a implantação de centrais solares, assim como as áreas urbanas e de expansão urbana e as áreas de aptidão agrícola. Broesamle *et al.* (2001) afirma que as regiões típicas para a instalação de centrais solares são as regiões secas e áridas como as regiões desérticas.

As permissões referentes ao uso do solo (relações contratuais estabelecidas entre os proprietários da terra e os desenvolvedores de projeto) também devem ser abordadas em um estudo de localização de centrais solares. Para isto é necessário relacionar, primeiramente, os tipos contrato que se estabelecem entre as partes envolvidas.

Nessa pesquisa, em virtude da escala de trabalho 1:10.000.000, serão abordadas apenas as restrições quanto ao uso e ocupação do solo. Entretanto, ressalta-se que em escalas maiores (por exemplo, 1:10.000 ou maiores), onde podem ser visualizados os terrenos, as questões relacionadas as permissões devem ser abordada.

As áreas urbanas e de expansão urbanas também não serão consideradas na escala 1:10.000.000, uma vez que nesta escala a representação destas áreas não é tematicamente visível. Entretanto em estudos específicos (em escalas maiores), por exemplo, em um município, estas regiões devem ser analisadas.

#### 4.4.2 Recurso solar

Uma central termoeletrica solar requer alta incidência de irradiação solar direta normal para proporcionar uma ótima operação do sistema, uma vez que a potência gerada pela usina depende também da quantidade de irradiação solar que é concentrada. Outro fator importante é a dimensão requerida do campo solar que, para uma dada capacidade de potência da usina é, em geral, proporcional ao nível de irradiação solar.

Um concentrador cilíndrico parabólico concentra praticamente a parcela direta da irradiação solar que incide em sua superfície e uma fração muito pequena (desprezível) da difusa. Por isso, para o estudo da localização das áreas aptas a instalação de centrais solares tipo SEGS faz-se imprescindível o conhecimento da irradiação solar direta normal.

Os dados de irradiação solar direta normal são, geralmente, obtidos de medições feitas com equipamentos específicos (pireliômetros) ou em modelos matemáticos que tratam a irradiação global (parcela direta e difusa). Dados de satélites meteorológicos também têm sido usados para prover esta informação. Para analisar a disponibilidade do recurso solar no Semi-Árido Nordestino, os dados de irradiação solar direta normal, com uma resolução de 40 km, foram obtidos no Solar and Wind Energy Resource Assessment (SWERA, 2009).

Os valores que serão utilizados correspondem aos valores diários médios anuais e para a região do Semi-Árido Nordestino estes valores foram enquadrados em três grupos: irradiação de 4,0 a 5,0 kWh/m<sup>2</sup>, irradiação de 5,0 a 6,0 kWh/m<sup>2</sup> e irradiação de 6,0 a 7,0 kWh/m<sup>2</sup>.

Em uma abordagem mais específica os cruzamentos de PI com os dados sazonais de irradiação solar (valores referentes ao verão e ao inverno) devem ser utilizados.

#### 4.4.3 Suprimento de água

Uma central solar tipo SEGS (80 MW) operando com um fator de capacidade anual de 0,27, por exemplo, usa cerca de 725.000 m<sup>3</sup> de água (KELLY, 2006). Esta quantidade de água é necessária para as torres de refrigeração (cerca de 90%), geração de vapor no ciclo de potência (8%) e para a limpeza dos espelhos (2%). O fluxo típico para a torre de refrigeração é de 320m<sup>3</sup>/h. Além disto, a água deve também apresentar qualidade adequada para evitar incrustações e oxidações dos equipamentos.

Na região do Semi-Árido a disponibilidade de água é uma questão muito importante, haja vista que se conhece a relativa escassez de mananciais hídricos de superfície. Um dos principais rios que cortam o Semi-Árido é o Rio São Francisco, que segundo o Ministério de Integração Nacional (2010), recebe água de 168 afluentes e banha os Estados de Minas Gerais, Bahia, Pernambuco, Sergipe e Alagoas. Sua bacia hidrográfica também envolve parte do Estado de Goiás e o Distrito Federal.

#### 4.4.4 Disponibilidade de área e topografia do terreno

A disponibilidade de área para a central termoeletrica solar é necessária para acomodar o campo de concentradores cilíndricos parabólicos. Uma usina SEGS de 80 MW, por exemplo, requer cerca de 2 km<sup>2</sup> de área, da qual cerca de 500.000 m<sup>2</sup> é para o arranjo de coletores. O fator de escala derivado das experiências das SEGS mostra que é vantajoso instalar várias usinas adjacentes. Assim, a disponibilidade mínima de área poderia ser 8 km<sup>2</sup>, por exemplo, ou seja, um complexo de geração de 320 MW. A disponibilidade da área será dada em função dos cruzamentos dos PI, a partir dos arquivos vetoriais do tipo polígono.

A topografia do terreno onde será implantada a central solar determina a aceitabilidade do local segundo seu impacto no custo relativo à preparação do terreno. Este local deve ser o mais plano possível, exceto por uma declividade para permitir uma drenagem natural do terreno.

Os dados usados para determinar a declividade serão as imagens do sensor SRTM (Shuttle Radar Topography Mission). As imagens têm resolução espacial de 90 m, formato geotiff (16bits) e estão georreferenciadas ao Sistema Geodésico de Referência (SGR) WGS84, que é compatível com o SGR SIRGAS2000 para a escala de trabalho usada.

#### 4.4.5 Conexão com a rede elétrica

Os requisitos de conexão com a rede elétrica para uma central solar que usa coletores cilíndricos parabólicos são semelhantes aos de outras usinas a vapor. De acordo com DAHLE *et al.* (2008) uma usina que produz 80 MW de potência, por exemplo, deve dispor de linhas de transmissão de 230 kV de potência para o transporte da energia.

Além de capacidade de carga, deve-se considerar outro aspecto importante: a distância entre a central solar e as subestações. Como os custos de construção de novas linhas de transmissão são, em geral, muito altos e dependem do nível de voltagem da linha e de seu comprimento, a central solar deve estar posicionada o mais próximo possível de linhas de transmissão com capacidade de carga.

Na região do Semi-Árido Nordeste, as linhas de transmissão são de 230 kV e 500 kV de potência. As linhas de 230 kV de potência recobrem todos os estados do Semi-Árido Nordeste, ao passo que as linhas de 500 kV recobrem os estados de Ceará, Piauí, Pernambuco, Alagoas, Bahia e Sergipe.

#### 4.4.6 Disponibilidade de combustível para backup

Combustíveis para backup são necessários para a operação híbrida da central solar. Nas usinas SEGS é usado o gás natural como backup. Na região do semi-árido nordestino deve-se considerar, além do gás natural, a o biodiesel e óleo diesel. Além da disponibilidade de combustíveis para backup, deve-se considerar outra questão: se a geração híbrida é uma exigência para a implantação da central, a proximidade da central com as fontes destes combustíveis é um fator determinante. Assim, distâncias muito grandes podem tornar a operação híbrida economicamente inviável.

#### 4.4.7 Acesso

O acesso ao local é relevante pela necessidade de transportar equipamentos de grande porte e frágeis (espelhos de vidro). Os critérios para classificar o acesso são as larguras das rodovias, qualidade da superfície da estrada e possibilidades de manobras de veículos de grande porte. Assim, para definir o mapa do sistema viário do Semi-Árido Nordeste serão utilizadas as principais rodovias federais e estaduais que cortam a região.

### 4.5 Aplicação do SIG para o estudo de localização de centrais solares

Uma vez definida a Base de Dados Espaciais (BDE), os planos de informação (PI) devem ser gerenciados no SIG para fornecer suporte à decisão de localização da central solar. No caso do Semi-Árido Nordeste, os cruzamentos dos PI foram feitos visando fornecer uma pré-localização das áreas potenciais à instalação de centrais solares.

Um dos cruzamentos primordiais nesse estudo é o da análise de área disponível para a instalação da central solar. Considera-se nesta pesquisa que áreas ocupadas por qualquer PI que integra o grupo de uso e ocupação do solo (indicados no item 4.4.1) são consideradas áreas inaptas a instalação das centrais solares. Desse modo, Os PI do uso e ocupação do solo devem ser cruzados com o PI do Semi-Árido Nordeste, por meio do uso de operações booleanas da Álgebra de Campos, para identificar os locais potenciais de instalação de centrais solares. No cruzamento pode ser utilizado o seguinte critério: Caso a região do Semi-Árido Nordeste seja também uma das áreas do grupo de uso e ocupação do solo, classifique 0 (zero). Caso contrário, classifique 1 (um). O resultado deste cruzamento mostrará quais áreas podem ser utilizadas para a implantação da central solar, segundo a análise inicial desses dois PI.

A partir do resultado deste cruzamento, os demais cruzamentos podem ser realizados. Os planos de informação devem ser gerenciados para fornecer suporte a decisão de localização da central solar a partir de uma relação lógica que será estabelecida entre eles e que definirá, como um resultado parcial, um “PI resultante”, como foi o caso do cruzamento apresentado acima. Para os cruzamentos dos planos de informação, pode-se ainda considerar a criação de alguns subconjuntos, que permitirá co-relacionar os PI segundo sua relevância no processo de definição das áreas aptas à implantação de centrais solares.

Considere, por exemplo, um subconjunto formado por apenas dois planos de informação: irradiação solar direta normal (valor diário médio anual) e uso e ocupação do solo. Para se instalar a central solar deve-se dispor de uma região com disponibilidade de irradiação solar direta normal e que o uso do solo seja disponível (isto é, não seja área agriculturável – boa aptidão agrícola, não seja unidade de conservação, não seja área de reserva de Mata Atlântica, não seja território indígena e ou quilombola, nem área urbana e de expansão urbana).

Considere também que a irradiação solar direta normal seja definida em quatro conceitos 1-Ótima (O) quando a irradiação solar está no intervalo 6,0 a 7,0 kWh/m<sup>2</sup>; 2-Boa (B) quando a irradiação solar está no intervalo 5,0 a 6,0 kWh/m<sup>2</sup>; 3-Regular (RE) quando a irradiação solar está no intervalo 4,0 a 5,0 kWh/m<sup>2</sup>; e 4-Ruim (RU) quando a irradiação solar está abaixo de 4,0 kWh/m<sup>2</sup>. Ressalta-se que esse critério está sendo definido apenas para ilustrar um exemplo de aplicação de análises em subconjuntos.

As áreas que integram o uso e ocupação do solo são definidas segundo uma lógica booleana (ou pode se instalar a central solar, ou não se pode instalar). Nesse sentido será feita duas classificações: Ótimo (O - pode instalar) e Péssimo (P - não se pode instalar a central solar). Assim, poderá ser formada a seguinte regra ou função para o relacionamento destes planos de informação: “apenas quando for ótimo (em irradiação solar) e ótimo (em uso e ocupação do solo) coloque ótimo. Caso contrário, coloque péssimo”. Então, o relacionamento entre estes PI, neste subconjunto, indicará como resultado as regiões propícias à instalação da central solar, conforme ilustra a figura 7.

Irradiação Solar				Uso e Ocupação do Solo				Resultado			
O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
O	O	RE	RE	O	O	O	O	O	O	P	P
RU	RU	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P
RU	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P

Figura 7 – Cruzamento de informações para localização da central solar

A partir das informações apresentadas na figura 7 pode ser gerada a tabela 2 que apresenta a relação entre o dois planos de informação (tabela-verdade).

Tabela 2. Relacionamento entre os dois planos de informação: irradiação solar e uso e ocupação do solo.

Irradiação solar direta normal (PI 1)	Uso e ocupação do solo (PI 2)	Resultado (PI resultante)
O	O	O
P	O	P
RE	O	P
RU	O	P
O	P	P
P	P	P
RE	P	P
RU	P	P

Para uma implantação deste porte é necessário avaliar todos os planos de informação de forma a analisar os locais mais adequados. Como resultado, deve-se ter mapas temáticos que contemplem as regiões aptas a implantação.

O critério a ser usado para a identificação das áreas propícias à instalação das centrais solares no Semi-Árido Nordeste é a de que as áreas aptas devem ter uma irradiação solar entre 6,0 a 7,0 kWh/m<sup>2</sup> e não ocupar qualquer uma das áreas do grupo de uso e ocupação do solo. Além disso, o local deve apresentar também baixa declividade e estar localizado o mais próximo possível dos recursos hídricos, das vias de acesso e das linhas de transmissão.

Para definir um PI resultante, em alguns cruzamentos, devem ser atribuídos diferentes pesos compensatórios aos PI para indicar a importância de uma dada variável em relação às demais. Nos casos em que os pesos foram iguais, ou seja, quando a influência de todos os PI num dado relacionamento tiver mesmo grau de importância, a função lógica será vista como uma simples manipulação entre os PI, supondo-se que estes possuem valores a priori definidos. Como foi o exemplo dos PI envolvidos na figura 7. Por outro lado, se os pesos compensatórios forem diferentes, formar-se-á uma equação entre os PI que reunirá a importância de cada variável requerida na indicação final das áreas propícias a instalação das centrais solares.

Para os casos em que ambos os planos de informação envolvidos na análise de um dado subconjunto tenham pesos compensatórios, a carta temática deverá apresentar uma indicação dos locais segundo níveis de adequação, ou seja, utilizando-se de representações numéricas, poderá ser comparado se um dado local é mais adequado que o outro para a instalação da central solar.

## 5. CONCLUSÕES

A análise de áreas com potencial de instalação de centrais solares em SIG é um dos passos importantes para a escolha do local onde será construída uma central solar. O estudo requer, em um primeiro momento, a disponibilidade dos dados espaciais bem como sua padronização, segundo, o entendimento e a aplicação das operações de Álgebra de campos e objetos.

A partir dos fundamentos de metodologia de localização de centrais termoeletricas solares de grande porte na região do Semi-Árido Nordeste, apresentados nesse artigo, será possível desenvolver mapas temáticos que poderão ser cruzados no ambiente SIG para a localização destas centrais e os resultados apresentados.

Uma abordagem que se mostra interessante é a pré-definição das áreas aptas a instalação, a partir do cruzamento de informações em grandes regiões (escalas pequenas – 1:10.000.000), como foi o exemplo do Semi-Árido Nordeste. Isto proporciona visualizar a distribuição espacial dos PI na região de estudo, para posteriormente, promover visualizações em escalas maiores, ao nível de municipalidade, por exemplo.

Os critérios utilizados para se instalar a central solar (considerar áreas com irradiação solar entre 6,0 a 7,0 kWh/m<sup>2</sup>, não ocupar qualquer uma das áreas do grupo de uso e ocupação do solo, apresentar baixa declividade e estar o mais próximo possível dos recursos hídricos, vias de acesso e linhas de transmissão) foram criados para definir uma abordagem ao estudo, baseando-se na literatura. Porém, outros critérios podem ser desenvolvidos.

## REFERÊNCIAS

- ASA Articulação no Semi-Árido Brasileiro. 2008. <<http://www.asabrasil.org.br>> Acesso em dezembro.
- Barbosa, C. C. F. 1997. Álgebra de Mapas e suas Aplicações em Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento. Dissertação de Mestrado, INPE, São José dos Campos.
- Broesamle, H., Mannstein, H., Schillings, C., Trieb, F. 2001. Assessment of Solar Electricity Potentials in North Africa based on Satellite Data and a Geographic Information System. *Solar Energy*, v. 70, n. 1, pp. 1-12.
- Burrough, P.A., McDonnell, R. A. 1998. Principles of Geographical Information Systems. Oxford, Clarendon Press, 2ª edição, 311p, 1998.
- Coelho, G. B. 2006. Análise e simulação do processo em transformação de chuva em vazão com suporte de sistemas de informações geográficas. Dissertação de Mestrado, PPGCGTG, UFPE, Recife.
- Cunha, J. G. D. 2006. O Uso de Tecnologias da Geoinformação no Apoio às Ações Estruturais de Redução de Riscos em encosta. Dissertação de Mestrado, PPGCGTG, UFPE, Recife.
- Dahle, D., Elliott, D., Heimiller, D., Mehos, M., Robichaud, R., Schwartz, M., Stafford, B., Walker, A. 2008. descriptions of renewable energy Technologies. In: National Renewable Energy Laboratory (NREL). Assessing the Potential for Renewable Energy Development on DOE Legacy Management Lands.
- Goodchild, M. F.; Haining, R. P. GIS and spatial data analysis: covering perspectives. *Papers in Regional Science*, v. 83, p. 363-385, 2004.
- Kelly, B., 2006. Nexant Parabolic Trough Solar Power Plant Systems Analysis, Task 2: Comparison of Wet and Dry Rankine Cycle Heat Rejection, NREL/SR-550-40163.
- Price, H. W. 1999. Parabolic Trough Solar Power for Competitive U.S. Markets. ASME Renewable and Advanced Energy Systems for the 21st Conference. Maui, Hawaii.
- Rabl, A. 1985. Active solar collectors and their applications, Oxford University Press, Oxford.
- Rolim, M. M. 2007. Modelagem Analítica de Geração Solar Térmica de Eletricidade com Concentradores Parabólicos de Foco Linear. Tese de Doutorado, PROTEN, UFPE, Recife.
- Rolim, M. M., Fraidenraich, N., Tiba, C. 2009. Analytic modeling of a solar power plant with parabolic linear collectors. *Solar Energy*, v. 83, n. 1, pp. 126-133.
- Solar Trough. 2008. <[http://www.solarpaces.org/CSP\\_Technology/docs/solar\\_trough.pdf](http://www.solarpaces.org/CSP_Technology/docs/solar_trough.pdf)> Acesso em novembro.
- Tiba, C., Fraidenhaich, N., Barbosa, E. M. S. B., Candeias, A. L. B., Neto, P. B. C., Filho, J. B. M. 2008. SIGA SOL 1.0 (Sistema de Informação Geográfica Aplicada à Energia Solar). Parte I: Descrição geral e metodologia. II Congresso Brasileiro de Energia Solar e III Conferência Regional Latino-Americana da ISES. Florianópolis.
- Tiba, C., Fraidenhaich, N., Moskowicz, M., Cavalcanti, E. S. C., Lyra, F. J. M., Nogueira, A. M. B. 2001. Atlas Solarimétrico do Brasil - Banco de dados Terrestres. Editora Universitária de Pernambuco, ISBN 85-7315-142-0, Recife.
- Tomlin, c. d. 1990. Geographic Information System and Cartographic modeling. New Jersey: Prentice-Hall. John Wiley e sons.

## **STUDY LOCATION OF SOLAR THERMAL POWER STATIONS OF LARGE SIZE IN NORTHEASTERN SEMI-ARID - FUNDAMENTALS AND METHODOLOGY**

**Abstract.** *With growing concern to produce electricity from renewable energy, the thermal solar electricity generation has repercussions in many countries, such as Spain, Portugal and Germany. In Brazil, this generation of energy in large projects (above 80MW), is still not carried out. However, it is known that the country has large areas with availability of direct solar radiation normal (one of the main parameters for the installation of solar power plants) in the Northeast of Brazil, specifically in the semiarid region, which has also other important variables for the installation of these plants, such as: great topographical conditions, low wind speed, low population density and lands that are not used for agriculture, for example. Furthermore, the introduction of solar power plants in the region will provide several benefits such as growth and development of a region, the implementation of social benefits and job creation. By means of a Geographic Information System (GIS) all important variables in the location of a solar power plant are represented as spatial data and, when modeled, allow to indicate the places suitable for installation of these plants. The GIS has resource to manipulate spatial data, providing fast and efficient identification of suitable places for installing solar plants while establishing future scenarios for energy planning, with their respective impacts, costs and benefits. This paper shows some fundamentals study of the best localization of solar thermoelectric central in Brazilian semi-arid, in scale 1:10.000.000. The tools of GIS (Geographic Information System) are presented and the localization will be defined with different information planes that are important in this case like: soil, direct normal solar radiation (annual average daily value), water, topography, etc. Maps algebra of information plane is used to define the best localization.*

**Key words:** Solar Energy, Solar Thermoelectric Plants, Geographic Information System.